



## Bygningssdynamik

Christensen, Jørgen Erik

*Published in:*  
EnDrIn FM-Lærebog

*Publication date:*  
2018

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Christensen, J. E. (2018). Bygningssdynamik. In *EnDrIn FM-Lærebog*

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# 12. BYGNINGSDYNAMIK

---

Version: December 2018

*Jørgen Erik Christensen, Lektor*

*DTU Byg*

*jec@byg.dtu.dk*

*Dette kapitel om bygningsdynamik er en generel introduktion for at give en overordnet forståelse af emnet og henvender sig primært til brug for undervisning på ingeniør- og maskinmesteruddannelsen. Færdiguddannede ingeniører eller maskinmestre kan også få inspiration fra materialet.*

*Ved skrivning af dette kapitel er der lagt vægt på at inkludere relevante figurer og tabeller fra aktuel litteratur. Dette er for at gøre det lettere ved læsning af kapitlet. Kapitlet er primært skrevet som lærebogsmateriale for studerende, som på kort tid skal finde den relevante information.*

*ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, CTS, bygnings-dynamik, nøgletal og energirenovering. Alle afsnit behandler det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til "Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger". Spørgsmål, kommentarer mv. kan rettes til forfatteren.*



**ELFORSK**

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 ([www.elforsk.dk](http://www.elforsk.dk)).

## 12.1. Indhold

12.1.	Indhold .....	12-2
12.2.	Læringsmål.....	12-4
12.3.	Nomenklatur og sprogbrug.....	12-5
12.4.	Indledning.....	12-9
	Baggrund for kapitlet .....	12-9
12.5.	Varmeakkumulering og tidskonstant .....	12-10
	Varmeakkumulering i Beton .....	12-10
	Tidskonstant .....	12-11
12.6.	Analyse af termisk indeklime og energiforbrug.....	12-14
	Lovmæssige krav.....	12-15
	Erhverv ifølge bygningsreglementets bestemmelser.....	12-16
	Krav til indeklime – Indeklimaklasser .....	12-16
	Beregningsmetoder for termisk indeklime .....	12-17
12.7.	Ventilationens størrelse.....	12-19
	Myndighedskrav – Arbejdstilsynets anbefalinger.....	12-19
	Atmosfærisk indeklime .....	12-19
	Termisk indeklime – Grundlæggende beregningsmetoder .....	12-20
12.8.	Varmebelastninger .....	12-21
12.9.	Interne varmebelastninger – Udstyr, personer .....	12-22
	Personer.....	12-22
	Udstyr og Belysning.....	12-22
	Indeklima- og energiberegninger .....	12-23
12.10.	Eksterne varmebelastninger – Solindfald.....	12-29
	Solstråling.....	12-29
	Ruder .....	12-32
	Rudetyper .....	12-34
	Solafskærmning.....	12-41
	Beregning af transmitterede solstråling gennem rude.....	12-54
12.11.	Udetemperatur, Vejrdata, Reference år .....	12-57
	Udetemperatur .....	12-57
	Vejrdata, Reference år, DRY Danmark 2013 .....	12-58
12.12.	Varmebalance – Termisk indeklime .....	12-61

Kravspecifikationer til indeklimaklasser.....	12-64
Temperaturforhold .....	12-64
12.13. Maksimal timemiddelindetemperatur .....	12-67
Anvendelse af Maksimal timemiddelindetemperatur .....	12-68
12.14. Døgnmiddelindetemperatur.....	12-69
Løsning af varmebalanceligningen .....	12-69
Anvendelse af metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” .....	12-75
12.15. Dynamiske simuleringsprogrammer .....	12-77
Største varme- /kølebelastninger .....	12-77
Perioder for det termiske indeklima .....	12-78
12.16. Litteratur/referencer .....	12-80
12.17. Appendiks A – Solstråling .....	12-82
Solindfald på flader .....	12-82
Solindfald .....	12-85
12.18. Appendiks B – Solindfald gennem rude .....	12-86
Illustration af lineær interpolation.....	12-87
12.19. Appendiks C – Tabeller solstråling, reference dobbeltrude.....	12-88

## 12.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- forstå begrebet tidskonstant
- forstå de vigtige parametre for intern varmebelastning
- forstå den eksterne varmebelastning fra solstråling
- forstå varmebalancen for en bygning og hvilke niveauer den kan løses på
- forstå forskellige metoder til at beregne ventilationsluftmængden
- forstå anvendelse af kravspecifikationer til indeklimaklasser
- forstå vejrdata og reference år
- have en overordnet forståelse for dynamiske simuleringsprogrammer

## 12.3. Nomenklatur og sprogbrug

<b><u>SYMBOL</u></b>	<b><u>ENHED</u></b>	<b><u>BESKRIVELSE</u></b>
$A$	$m^2$	Areal af flade
$A$	$m^2$	Rummets gulv areal (Dansk Standard, 2007a)
$A_{rude}$	$m^2$	Areal af rude
$A_{vin}$	$m^2$	Areal af vindue
$F_c$	–	Afskærmningsfaktor
$F_{rude}$	–	Korrektionsfaktor for rudeareal i forhold til vinduesareal: $F_{rude} = A_{rude}/A_{vin}$
$F_s$	–	Skyggefaktoren, den resulterende værdi for skygger for vinduer med indbygning, udhæng, sidefiner
$G$	$W/m^2K$	Varmeoverføringskoefficient, varmeovergangstal. (anvendt i Dansk Standard, 2007b). Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
$g$	–	g-værdi for rude. Total transmittans af solenergi for ruden. Denne værdi er summen af den direkte transmitterede solstråling og den absorberede stråling i ruden, der tilføres til rummet på den indvendige side af ruden
$g_{ref}$	–	g-værdi for reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76
$g_{rude}$	–	g-værdi for aktuel rude der anvendes (SBI-anvisning 264, 2016b)
$g_{sys}$	–	g-værdi for systemets solenergitransmittans (SBI-anvisning 264, 2016b)
$H$	$W/K$	Rummets termiske konduktans
$H_L$	$W/K$	Varmekonduktans ved ledning mellem indvendig og til det fri
$H_{L,nabo}$	$W/K$	Varmekonduktans ved ledning mellem indvendig og til naborum
$H_{inf}$	$W/K$	Infiltrationsluftens kapacitetsstrøm
$H_{luft}$	$W/K$	Lufts kapacitetsstrøm (generel beskrivelse)
$H_{luft,nabo}$	$W/K$	Luftudveklings med naborum, naborummets kapacitetsstrøm
$H_{natkol}$	$W/K$	Nattekølingens kapacitetsstrøm (benyttes til køling med natteudeluft)
$H_{vent}$	$W/K$	Ventilationsluftens kapacitetsstrøm
$h$	$W/m^2K$	Varmeoverføringskoefficient, varmeovergangstal
$h_{inf}$	$h$	Antal timer i døgnet med infiltration (normalt 24 timer, døgnet)
$h_{natkol}$	$h$	Antal timer i døgnet med køling med natteudeluft
$h_{vent}$	$h$	Antal timer i døgnet, hvor ventilation kører
$I_{t,dif}$	$W/m^2$	Transmitteret diffus himmelstråling fra sol gennem uafskærmet standard dobbeltrude
$I_{t,dir}$	$W/m^2$	Transmitteret direkte solstråling gennem uafskærmet standard dobbeltrude
$I_{t,reflek}$	$W/m^2$	Transmitteret reflekteret stråling fra omgivelser fra sol gennem uafskærmet standard dobbeltrude

$I_{tot}$	$W/m^2$	Total solstråling per $m^2$
$I_{tot,t}$	$W/m^2$	Total transmitterede solstråling per $m^2$
$LT$	–	Lys transmittans, Dagslys transmittans (gennem rude)
$n$	$h^{-1}$	Luftskifte per time
$n_p$	<i>personer</i>	Planlagt værdi for antal personer i rummet (Dansk Standard, 2007a)
$Q$	$J, Wh$	Energi
$Q_{int}$	$J, Wh$	Energitilskud fra internt varmetilskud
$Q_{sol}$	$J, Wh$	Energitilskud fra solindfald
$q_B$	$l/(s, m^2)$	Ventilationsluftmængde for emissioner fra bygning (Dansk Standard, 2007a)
$q_p$	$l/(s, person)$	Ventilationsluftmængde til forbrug pr. person (Dansk Standard, 2007a)
$q_{tot}$	$l/s$	Rummets samlede ventilationsluftmængde (Dansk Standard, 2007a)
$q_V$	$l/s, (m^3/s)$	Volumenstrøm, strømningens flow
$q_{V(h)}$	$m^3/h$	Volumenstrøm, strømningens flow
$S$	$J/K$	Rummets varmekapacitet
$U$	$W/m^2K$	Varmetransmissionskoefficient, U-værdi
$U_g$	$W/m^2K$	Termisk transmissionskoefficient (U-værdi) af ruden
$V$	$m^3$	Volumen
<b>Græske bogstaver</b>		
$\alpha$	–	Absorptans (gennem rude)
$\alpha_{e,B}$	–	Absorptans for direkte sol for afskærmning. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
$\gamma_{OH}$	<i>grader (vinkel)</i>	Vandret udhæng: Vinkel i grader fra midten af vinduet til forkanten af udhænget
$\gamma_{SF}$	<i>grader (vinkel)</i>	Sidefremspring: Vinkel i grader fra midten af vinduet til forkanten af fremspringet
$\theta$	$^{\circ}C$	Temperatur
$\bar{\theta}$	$^{\circ}C$	Døgnmiddeltemperatur (streg over betyder det er middelværdien)
$\theta_e$	$^{\circ}C$	Udetemperatur
$\theta_i$	$^{\circ}C$	Indetemperatur
$\theta_{ind}$	$^{\circ}C$	Temperatur indstrømning/indblæsning
$\theta_{nabo}$	$^{\circ}C$	Temperatur i naborum
$\theta_{natkol}$	$^{\circ}C$	Temperatur af natteudeluft ved køling med natteudeluft
$\theta_{rum}$	$^{\circ}C$	Rumtemperatur

$\theta_{ud}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur udstømning/udsugning
$\theta_{vent}$	$^{\circ}\text{C}$	Ventilationsluftens indblæsningstemperatur
$\Delta\theta_u$	$^{\circ}\text{C}$	Amplitude for udelufttemperatur
$\rho$	–	Reflektans, Reflektans fra omgivelser, Reflektans (gennem rude)
$\rho_{e,B}$	–	Reflektans af direkte sol for afskærmning. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
$\tau$	–	Lys transmittans, Dagslys transmittans (gennem rude)
$\tau_{e,B}$	–	Transmittans af direkte sol for afskærmning. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
$\tau$	$s$	Tid i sekunder
$\tau_h$	$s$	Tid i timer
$\tau_h$	–	Klokkeslæt (klokken 1 til 24), ved beregning af temperatursvingning
$\tau_{h,max}$	–	Klokkeslæt hvor maksimum indtræder (klokken 1 til 24)
$\tau_0$	$s$	Tidskonstant
$\Delta\tau$	$s$	Længde af tidsperiode i sekunder
$\Delta_h\tau$	$s$	Længde af tidsperiode i timer
$\Phi$	$W$	Effekt
$\Phi_{sol}$	$W$	Solindfald gennem vinduets glasareal
$\bar{\Phi}$	$W$	Gennemsnitlig effekt over døgnet (streg over = middelværdien)
<b>Indices</b>		
"0" 0		Refererer til starttidspunktet "0", f.eks. effekten $\Phi_0$ til tiden 0
$l, 2$		Nummer på flade
$B$		Indeks for afskærmning (b for blind). Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
<i>bortledt</i>		Bortledt effekt/energi
$e$		Ude (exterior), ydre
$e$		Energi. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
$g$		Glas, benyttes ved U-værdi for rude (se også indices "rude")
$h$		Time (engelsk: hour)
$i$		Inde
<i>inf</i>		Infiltration
<i>int</i>		Intern (varmelast)
$L$		Ledning ved transmission til udvendig



<i>L,nabo</i>		Ledning ved transmission til naborum
<i>luft</i>		Luft
<i>nabo</i>		Naborum
<i>natkøl</i>		Nattekøling ved at benytte kølig natteudeluft
<i>OH</i>		Vandret udhæng (engelsk: overhang)
<i>p</i>		Personer
<i>ref</i>		Reference, reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76 Reference for reflektans fra omgivelser (sættes ofte til $\rho_{ref}=0,25$ eller 0,2)
<i>reflek</i>		Transmitteret reflekteret stråling fra omgivelser fra sol gennem uafskærmet standard dobbeltrude
<i>rude</i>		Rude, aktuel rude der benyttes (SBI-anvisning 264, 2016b)
<i>SF</i>		Sidefremspring
<i>sol</i>		Sol
<i>sys</i>		System, rude/system (rude + afskærmning)
<i>t</i>		Transmitteret solstråling
<i>tilført</i>		Tilført effekt/energi
<i>tot</i>		Total
<i>vent</i>		Ventilation
<i>vin</i>		Vindue

## 12.4. Indledning

### Baggrund for kapitlet

En central komponent i bygningsdynamikken er bygningens varmebalance og de indgående parametre. En vigtig faktor er solfaldet, der er den mest komplekse størrelse og har en afgørende betydning for at opnå et tilfredsstillende termisk indeklima. Solindfald gennem ruder med tilhørende solafskærmning er derfor beskrevet detaljeret.

Bygningens varmebalance kan foregå på mange niveauer fra de meget detaljerede beregningsmodeller i form af dynamiske simuleringsprogrammer med et eller mange tidsskridt pr. time til de enkle metoder med beregning af time- eller døgnmiddeltemperatur. Anvendelse af dynamiske simuleringsprogrammer er beskrevet andre steder, og vil ikke blive beskrevet i detaljer. Der er imidlertid inden for de sidste par år kommet to vigtige nye publikationer, som læseren kan have glæde af: (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) og (Branchevejledning for energiberegninger, 2014).

I dette kapitel vil varmebalancen for beregning af time- eller døgnmiddeltemperatur blive behandlet indgående, da de benyttes i mange mere forenklede byggerier til beregning af det dimensionerende kølebehov med tilhørende nødvendig luftmængde. Her kan anføres, at (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) har beskrevet mange væsentlige parametre, som bidrager til vigtige indgangsdata til beregning af døgnmiddelindetemperaturen. Herudover skal opmærksomheden henledes på, at beregning af det dimensionerende kølebehov ved brug af døgnmiddelindetemperatur metoden, kan være en god kontrol til at vurdere resultaterne fra de langt mere komplekse dynamiske simuleringsprogrammer.

Dette kapitel om bygningsdynamik fokuserer primært på det termiske indeklima med fokus på temperatur. Normalt vil omtale af termisk indeklima inkludere indflydelse på en persons varmebalance, og i denne indgår både temperatur og luftfugtighed. I denne beskrivelse vil der ikke blive set på lufthastigheder og trækgener, idet der henvises til KAPITEL 1, Indeklima, og dette gælder også en nærmere beskrivelse af parametrene for lufttemperatur, operativ temperatur, strålingstemperatur, strålingstemperaturasymmetri og tilknyttede parametre. Det samme gælder for atmosfærisk indeklima, visuelt indeklima og akustisk indeklima, der ikke vil blive behandlet i dette kapitel.

De krav, der bliver stillet op henfører primært til den operative temperatur.

## 12.5. Varmeakkumulering og tidskonstant

### Varmeakkumulering i Beton

Generelt er det en fordel at undgå for store temperaturudsving, da det giver anledning til meget høje eller lave temperaturer. Rent komfortmæssigt er det en fordel, at temperaturudsvingene i løbet af en dag begrænses så meget som muligt. Et vigtigt element i denne sammenhæng er den termiske masse, der er i tunge konstruktioner i byggeriet, da de er med til at reducere variationerne i rumtemperaturer. På denne måde skabes et termisk indeklima med mindre temperaturvariationer, og det er med til at reducere spidsværdierne for specielt køling og opvarmning.

For at vurdere varmekapaciteten er det muligt at beregne den varmemængde, som i løbet af et halvt døgn bevæger sig ind i den varmeregulerede konstruktion og lagres i materialet, og denne varmemængde betegnes **varmeakkumuleringsevnen**.

Et af de vigtigste materialer i dansk byggeri er anvendelsen af beton, der samtidig er et materiale med en høj densitet og en god varmeakkumuleringsevne. Der kan generelt siges, at varmeakkumuleringsevnen forøges ved stigende densitet. Ifølge (Olsen et al., 2007) er varmeakkumuleringsevnen stigende de første 5 cm ind i konstruktionen og er tilnærmet proportionalt med tykkelsen. Ved en yderligere forøgelse fra 5 til 10 cm af tykkelsen reduceres effekten til en mindre stigning, og derfor har det ikke så stor en akkumuleringsevne. I praksis vil der på grund af varmemodstand ved materialets overflade og varmemodstand i selve materialet kun være en del af varmekapaciteten, der udnyttes i en konstruktion. Den del af materialets varmekapacitet, der er i stand til at fungere som varmeakkumulering, betegnes **den aktive varmekapacitet**.

I forbindelse med evnen til at udnytte varmekapacitet er adgangen til bygningens varmeakkumulerende lag af stor betydning, og kommer til udtryk i form af størrelse af overfladeareal af det varmeakkumulerende lag – jo større overfladeareal jo bedre varmeakkumulering.

En anden faktor for udnyttelse af varmekapacitet er en let adgang ind til det varmeregulerende lag i form af lave overgangsisolanser og isolanser indtil laget. Det er derfor et vigtigt punkt at reducere omfanget af isolerende lag foran de akkumulerende overflader. Dette kan f.eks. være nedhængte lofter, der er næsten helt lufttætte, og dermed ikke giver mulighed for luftcirkulation mellem rummet og over det nedhængte loft. Anvendelse af gulvbelægning har også stor betydning, og en belægning med en mindre varmemodstand giver den bedste udnyttelse af varmeakkumuleringen.

Ifølge (Olsen et al., 2007) kan påvirkningen fra den eksterne varmebelastning fra solindfald med fordel reduceres ved, at solpåvirkningen rammer de akkumulerende overflader direkte, da dette giver en mindre varmeovergangsmodstand ved transmission af energi til det varmeakkumulerende materiale. Dermed opnås en bedre varmeakkumulering.

Der kan opnås en god besparelse på energibehovet ved benyttelse af bygninger med stor termisk masse. Der kan opnås en reduktion i energibehovet ifølge (Olsen et al., 2007) på mellem 4 % og 13 % ved anvendelse af den mindste og største varmekapacitet for en kontorbygning.

En stor varmeakkumulerende masse i en bygning er med til at reducere overskudsvarmen i løbet af en dag, da denne akkumuleres i konstruktionerne, og dermed reducerer ulemperne med overtemperaturer. For en given bygning har den akkumulerende masse således stor betydning for, hvor stor temperaturudsvinget vil være i løbet af en dag. For tunge bygninger med en stor anvendelse af beton vil der være en stor akkumulerende masse, der vil bidrage til at dæmpe temperatursvingningerne. Dette er et nøglepunkt, eftersom et behageligt termisk indeklima opnås ved at reducere temperatursvingene, som er et af klagepunkterne. Dynamiske simuleringer er velegnede til at foretage vurderinger af temperaturudsvingene.

Dette er faktorer, som er vanskelige at vurdere ved anvendelse af Døgnmiddelindetemperatur metoden, og ikke kan vurderes ved brug af Maksimal timemiddelindetemperatur metoden.

Lette bygninger giver anledning til store temperatursvingninger, da der ikke er nogen nævneværdig akkumulerende masse, og det er derfor af stor betydning at undgå stort solindfald ind i lokalerne samt at undgå stor intern varmeudvikling.

En stor udnyttelse af den termiske masse i et byggeri resulterer i mindre anlæg og et lavere dimensionerende luftskifte for ventilation. Jo større temperaturvariation, der kan accepteres, jo mindre anlæg og lavere energiforbrug kan der opnås. Specielt kan opmærksomheden henledes på udnyttelse af ventilationsanlægget til nattekøling, hvor den lave udetemperatur kan benyttes til at blæse ind i bygningen og dermed fjerne den akkumulerede varme fra bygningen. Den største virkning opnås ved at køle bygningen ned så lavt som det kan accepteres, f. eks. 22 °C. Morgen minimums temperatur, som kan accepteres, afhænger i høj grad af brugerne af bygningen og deres forståelse for, hvordan bygningen fungerer og deres holdning til begrænsning af det globale energiforbrug og udledning af CO<sub>2</sub>.

## Tidskonstant

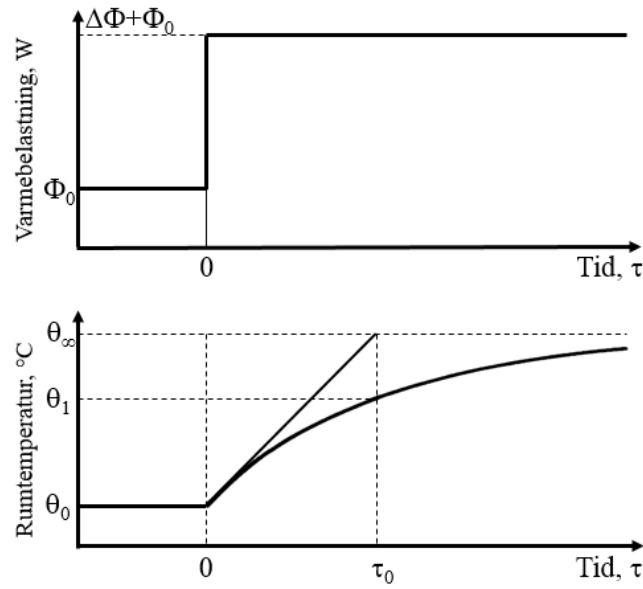
Et af de begreber, der ofte bliver benyttet i forbindelse med varmebalanceberegninger, er ”tidskonstanten”,  $\tau_0$ . For at forklare begrebet lidt nærmere i relation til rums bygningsdynamik betragtes et rum med rumtemperaturen  $\theta_0$  hvor varmebelastningerne efter at have været konstant  $\Phi_0$  i lang tid, pludselig ændres med  $\Delta\Phi$  jf. Figur 12-1.

Det første stykke tid vil temperaturændringen pr. tidsenhed være forholdsvis stor, og overfladetemperaturen stiger sammen med lufttemperaturen. Efterhånden som temperaturen stiger, vil varmetabet stige, og temperaturstigningen bliver langsommere. Den endelige temperatur nås først efter meget lang tid, men det væsentlige er, at størrelsen af den endelige ændring kun er afhængig af belastningsændringen og den termiske konduktans.

Inden belastningsændringen giver varmebalancen under stationære forhold:

$$\Phi_0 = H \cdot (\theta_{i,0} - \theta_e)$$

*Ligning 12-1*



Figur 12-1 Temperaturforløbet i et rum

Til tiden  $\tau = 0$  forøges belastningen øjeblikkeligt med  $\Delta\Phi$ , hvorved rumtemperaturen begynder at ændre sig  $d\theta/d\tau$ :

$$\Phi_0 + \Delta\Phi = H \cdot (\theta - \theta_e) + S \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad \text{Ligning 12-2}$$

hvor  $S$  er rummets varmekapacitet.

Indsættes (Ligning 12-1) i (Ligning 12-2) fås

$$\Delta\Phi = H \cdot (\theta - \theta_{i,0}) + S \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad \text{Ligning 12-3}$$

Løses ligningen ved indsættelse af begyndelsesbetingelserne  $\theta = \theta_{i,0}$  for  $\tau = 0$  fås:

$$\theta = \theta_{i,0} + \frac{\Delta\Phi}{H} \cdot (1 - e^{-\frac{H}{S}\tau}) \quad \text{Ligning 12-4}$$

Efter uendelig lang tid  $\tau = \infty$  vil parentesens i (Ligning 12-4) blive 1, og den nye stationære værdi for rumtemperaturen blive:

$$\theta_{\infty} = \theta_{i,0} + \frac{\Delta\Phi}{H} \quad \text{Ligning 12-5}$$

Tangenten i begyndelsestidspunktet  $\tau = 0$  for temperaturkurven skærer sluttemperaturen  $\theta_{\infty}$  efter forløbet af tiden:

$$\tau_0 = \frac{S}{H} \quad \text{Ligning 12-6}$$

Denne størrelse betegnes tidskonstanten. Indsættes  $\tau_0$  i (Ligning 12-4) fås:

$$\theta_1 = \theta_{i,0} + \frac{\Delta\Phi}{H} \cdot (1 - e^{-1}) = \theta_{i,0} + 0,63 \cdot \frac{\Delta\Phi}{H} \quad \text{Ligning 12-7}$$

Tidskonstanten kan følgelig defineres som den tid, der går før 63 % af den endelige temperaturændring er opnået.

Afhængigt af bygningskonstruktionen varierer tidskonstanten fra nogle få timer til flere døgn. De termiske belastninger er sjældent konstante i så lang tid, hvorfor der må tages nærmere hensyn til varmetabet og -akkumuleringen, hvis rumtemperaturen skal bestemmes nærmere.

## 12.6. Analyse af termisk indeklima og energiforbrug

Når en bygning skal analyseres, fokuseres der på to hovedkrav:

- indeklima
- energiforbrug

Der er en tæt kobling mellem energiforbruget og indeklimaet. Et godt indeklima kan kombineres med et lavt energiforbrug, hvis der foretages en indgående kvalificeret analyse med dynamiske simuleringsprogrammer. Dette kan f.eks. ske ved en simulering af det termiske indeklima for temperaturforholdene, og igennem en optimeringsproces at kunne reducere på anlæggene i bygningen og dermed skabe en reduktion i energiforbruget. Det er derfor i de fleste tilfælde en forudsætning for et lavt energiforbrug i en bygning, at der foretages en grundig analyse af det termiske indeklima.

Inden denne analyse igangsættes bør der imidlertid først fokuseres på en reduktion af de interne varmebelastninger og de eksterne varmebelastninger fra solindfald, da denne energitilførsel i mange tilfælde skal køles eller ventileres væk med dermed øget energiforbrug. Specielt skal opmærksomheden henledes på tidspunkter, hvor de maksimale termiske belastninger forekommer. Hvilke muligheder vil der være for at reducere maksimal belastningen, og hvilke omkostninger vil det eventuelt medføre.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at indeklimaet har stor indflydelse på menneskets velvære, og derfor er det vigtigt at fokusere på indeklimaet i højere grad end minimering af energiforbrug, når der skal foretages en samlet optimering af energiforbrug og indeklima. Som tidligere nævnt behøver der ikke være nogen modstrid mellem et godt indeklima og et lavt energiforbrug. Ved valg af indeklima klasse, hvor der stilles krav om et højere luftskifte pr. person, vil det imidlertid være med til at forøge energiforbruget. En indeklima klasse med kategori I med en luftmængde på 10 l/(s·person) i forhold til en kategori II med en luftmængde på 7 l/(s·person) vil give anledning til et større energiforbrug.

For at opnå de bedste forhold er det en fordel, at alle byggeriets interessenter bliver inddraget så tidligt som muligt for at få afklaret alle ønsker, da ændringer i en sen fase normalt vil føre til en fordyrelse af byggeriet. De vigtigste interessenter er følgende:

- bygherre
- brugere
- arkitekt
- rådgivende ingeniør
- udførende part af byggeriet
- evt. fremtidigt driftspersonale

I (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) er der en grundig gennemgang af optimeringsprocessen, og for nærmere detaljer henvises til denne. I dette kapitel om bygningsdynamik er kun medtaget de vigtigste faktorer for, at læseren af kapitlet får en

introduktion til denne del af emnet. For den professionelle part i byggeriet anbefales det at anvende den ovenstående primære kilde.

## Lovmæssige krav

I forbindelse med beregning af det termiske indeklima i bygninger findes en række lovmæssige krav, der skal overholdes og i den forbindelse er følgende love relevante:

- Bygningsreglementet
- Byggelovgivningen
- Arbejdsmiljøloven

Byggeloven og bygningsreglementet har til formål at sikre minimumskvalitet i byggeriet.

### *Bygningsreglementet*

Bygningsreglementet omhandler bestemmelser vedr. nybyggeri, renovering og/eller vedligehold af eksisterende bygninger og stiller krav om indeklima. I bygningsreglementet er der detailkrav til parametre, som kan opfattes som funktionskrav til indeklimaet.

### *Byggelovgivningen*

Ved anvendelse af byggelovgivningen refereres til normer og standarder for projektering, der skal følges, idet der i mange tilfælde kan sondres mellem forskellige indeklima niveauer. Dette giver bygherren mulighed for at vælge hvilket niveau, der foretrækkes for indeklimaet. Til at hjælpe bygherren med det rette valg er der udarbejdet nogle vejledninger, der inden for et givent område for byggeriet anviser god praksis. I denne forbindelse kan som eksempler gives: SBI-anvisninger, BYG-ERFA og InnoBYG branchevejledninger.

### *Arbejdsmiljøloven*

Arbejdstilsynets krav med tilhørende bekendtgørelser og vejledninger gælder eksisterende bygninger. Dette lovkompleks består af arbejdsmiljølovgivningen suppleret med bekendtgørelser og vejledninger fra arbejdstilsynet. Materialet fra arbejdstilsynet er baseret på det store erfaringsmateriale, som tilsynet har fået igennem mange år, og disse forskellige krav og værdier er ikke altid i overensstemmelse med bygningsreglementets krav med tilhørende referencer til normer og standarder.

Bygningsreglementets forlangender med hensyn til indeklima går altid foran krav fra arbejdstilsynet.



## Erhverv ifølge bygningsreglementets bestemmelser

Generelt skelnes der i bygningsreglementet mellem:

- boliger (behandles ikke i dette kapitel)
- erhverv

For at gøre fremstillingen i dette kapitel enklere og give en klarere introduktion til bygningsdynamik er det valgt kun at fokusere på erhverv. Bygningstyper inddelt i bolig og erhverv er vist i Tabel 12-1.

*Tabel 12-1 Anvendte bygningstyper inddelt efter bolig og erhverv ifølge bygningsreglementets bestemmelser baseret på (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) og (SBI-anvisning 264, 2016a)*

<b>Bolig</b>	<b>Erhverv (andet)</b>
Fritliggende enfamiliehuse (parcelhuse)	Kontor- og administrationsbygninger
Stuehuse ved landbrugsejendomme	Skoler, undervisnings- og forskningsinstitutioner
Dobbelthuse	Daginstitutioner og skolefritidsordninger
Rækkehuse	Sygehuse
Kædehuse	Idrætsanlæg og klubhuse
Gruppehuse	Detailhandel, service, butikker, og butikcentre
Tofamiliehuse	Engroshandel og opvarmet lager
Pleje- og døgninstitutioner	Fængsler
Kollegier	Institutioner med tvangsanbringelser
Hotelværelser	Psykiatri
Feriekolonier	Restauranter, biografer, forlystelser, museer, biblioteker, kirker etc.
Vandrehjem	Opvarmede værksteder og laboratorier samt let produktion og montage

## Krav til indeklima – Indeklimaklasser

Der stilles større krav til indeklimaet i erhvervsbygninger end i boliger, fordi brugerne ikke har så stor indflydelse på deres aktivitetsniveau, og hvilke lokaler de kan opholde sig samt hvor længe. Herudover kan der være krav til beklædning / dresscode.

Som vist på Tabel 12-1 dækker ordet erhverv over en bred vifte af bygninger, der har forskelligartede krav til indeklimaet, da de har store variationer i arbejdsforholdene.

På denne baggrund er der i (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) introduceret tre indeklimaklasser for erhvervsbygninger:

- Minimum – større grad af frihed til at tilpasse sig indeklimaet
- Standard
- Ambitiøs – mindre grad af frihed til at tilpasse sig indeklimaet.

De tre indeklimaklasser er udarbejdet med henblik på, i hvor høj grad brugerne er i stand til at tilpasse sig indeklimaet. Relevansen for forskellige indeklimaklasser gælder for rumtyper snarere end for bygningstyper, og anvendelsen af rummene vil være afgørende for, hvilken indeklimaklasse, der skal anvendes. Disse klasser kan for forskellige rum godt variere i en bygning.

Den valgte indeklimaklasse har indflydelse på energiforbruget og prisen på det samlede anlæg, idet en bedre klasse vil give en forøgelse af energiforbruget samt prisen på anlægget.

For hver indeklimaklasse er der opstillet krav for det termiske og atmosfæriske indeklima, samt et krav om maksimalt antal timer for anvendelse af udvendig solafskærmning.

Der godt kan sondres mellem kravene til atmosfærisk indeklima og termisk indeklima, således at de placeres i hver sin indeklimaklasse.

### *Indeklimaklasse – Minimum*

Denne klasse er aktuel for lokaler, hvor en person har stor mulighed for at flytte sig til et andet rum eller kun opholder sig i rummet i kortere perioder. Eksempler på disse kan være gangarealer og tekøkken.

### *Indeklimaklasse – Standard*

Denne klasse anvendes i standard tilfældene og er relevant for kontorer, møderum, klasselokaler, sengestuer, etc.

### *Indeklimaklasse – Ambitiøs*

Det er nødvendigt at anvende en Ambitiøs indeklimaklasse, hvis brugerne har mindre mulighed for at flytte sig til et andet rum eller mindre mulighed for at tilpasse deres tøj til det aktuelle indeklima på grund af dresscode. Ligeledes kan det være aktuelt på hospitaler for intensivstuer/ambulatorier og andre steder, hvor der opholder sig specielt sårbare og sensitive personer. Denne klasse kan også blive aktuel for et firma, som ønsker at lægge stor vægt på et godt indeklima.

## **Beregningsmetoder for termisk indeklima**

Metoder til beregning af det termiske indeklima og energiforbrug kan deles op i to hovedkategorier:

- Stationære forhold
- Ikke-stationære forhold

### *Stationære forhold*

Forholdene kan betragtes som stationære, hvis påvirkningerne på bygningen kun ændrer sig lidt med tiden. Hvor der antages stationære forhold er der ingen ændringer i varmeindholdet i de akkumulerende bygningsdele, og varmebalancen bliver følgelig simpel, svarende til almindelige varmetabsberegninger. I mange tilfælde kan energiforbruget, f.eks. for et hus, beregnes ved brug af en stationær metode.

Der kan som tilnærmelse anvendes stationære metoder til at få en vurdering af de nødvendige ventilationsluftmængder til lokalet og dermed en identifikation af temperaturforholdene.

Følgende to metoder omtales i den sidste del af kapitlet:

- 1) Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi) – Afsnit 0
- 2) Døgnmiddelindetemperatur – Afsnit 12.14

Der ses bort fra varmeakkumulering i bygningen, idet varmetab og varmtilskud antages identiske i sluttilstanden.

### *Ikke-stationære forhold*

For ikke-stationære forhold er det nødvendigt at medtage varmeakkumuleringen i bygningskonstruktionerne, og dette medfører at varmebalancen bliver langt mere kompliceret at beregne. Da det ikke er muligt at regne eksakt på disse forhold, gøres der en række tilnærmelser med hensyn til den in-stationære varmeledning gennem bygningskonstruktionerne.

Ved beregning af varmebalancen i et rum under ikke-stationære forhold medtages varmeakkumuleringen i bygningskonstruktionerne. Dette gøres normalt ved at benytte diskrete beregningsmetoder, hvilket betyder at tiden deles op i tidsstep  $\Delta\tau$  på maksimalt 1 time. Denne beregning kræver løsning af et ligningssystem, der repræsenterer al varmeudveksling i rummet. Dette betyder én ligning for rumluften og én ligning for hver overflade.

Beregningen af den in-stationære varmeledning deles i følgende to hovedkategorier:

- Differensmetoder
- Responsfaktormetoden

De to metoder til beregning af den in-stationære varmeledning vil ikke blive beskrevet nærmere her. Beregninger på timebasis foretages med brug af dynamiske simuleringsprogrammer – Afsnit 12.15.

## 12.7. Ventilationens størrelse

Ved analyse af indeklimaet vil der være mange faktorer, der skal tages hensyn til. Det er derfor ikke muligt at anvende standardløsninger i alle tilfælde. Der vil være behov for at tage med i betragtning, hvilke aktiviteter og processer som vil optræde i lokalerne.

I KAPITEL 8 om Ventilation vil der være en mere detaljeret beskrivelse af bestemmelsen af ventilationens størrelse, idet der dog i dette kapitel er fokuseret på størrelsen af ventilation for at opfylde det termiske indeklima.

Når der skal foretages en analyse af et lokale, er det ofte i forbindelse med dimensionering af et ventilationssystem, hvor der er behov for at vurdere ventilationsbehovet i løbet af et døgn. For at opnå en tilfredsstillende ventilation er det nødvendigt at sørge for et acceptabelt indeklima for såvel det atmosfæriske som det termiske indeklima. Ventilationens størrelse er baseret på tre krav:

- Myndighedskrav (minimumskrav)
  - Afhængig af bygningsbrug
- Atmosfærisk indeklima
  - Koncentrationer af fx CO<sub>2</sub>, partikler, (fugt) osv.
  - f. eks. DS/EN 15251, kategori II
- Termisk indeklima
  - Ikke for varmt – f. eks max. temp. 26°C

Der dimensioneres efter den største værdi, hvilket i de fleste tilfælde vil være værdien for dimensionering af det termiske indeklima. Der bør altid foretages en kontrolregning for at sikre, at det atmosfæriske indeklima er opfyldt.

I dette kapitel om Bygningdynamik er det punkt ”Termisk indeklima”, der fokuseres på. De to første punkter er beskrevet i KAPITEL 1 om Indeklima og KAPITEL 8 om Ventilation.

### Myndighedskrav – Arbejdstilsynets anbefalinger

Byggelovens regler og principper er beskrevet i detaljer i Bygningsreglementet (BR15; <http://bygningreglementet.dk/>). Bygningsreglementet skal bruges i forbindelse med projektering og opførelse af bygninger, se KAPITEL 1 om Indeklima for nærmere omtale.

Arbejdstilsynet anbefaler som en acceptabel komfortværdi for CO<sub>2</sub>-koncentrationen en øvre grænse på 1000 ppm (ppm – parts per million, 1000 ppm = 1 promille = 0,1 %) – Der tillades korte perioder med op til 2000 ppm.

Myndighedskrav vil ikke blive omtalt nærmere her.

### Atmosfærisk indeklima

Beregning af det atmosfæriske indeklima er beskrevet i KAPITEL 8, Ventilation. Da størrelsen på luftmængden for det atmosfæriske indeklima er meget relevant i forbindelse størrelsen på luftmængden for det termiske indeklima gengives beregningen her.

Samlet ventilationsmængde for et rum beregnes med ifølge (Dansk Standard, 2007 - side 33):

$$q_{tot} = n_p \cdot q_p + A \cdot q_B$$

Ligning 12-8

Den beregnede ventilationsluftmængde består af to dele: (a) ventilation for forurening fra forbrugeren og (b) for forureningen (emission) fra bygningen selv. De relevante parametre er vist i Tabel 12-2.

*Tabel 12-2 Grundlæggende krav til ventilation for atmosfærisk indeklima fra forurening fra personer og fra bygnings emissioner. (Dansk Standard, 2007a)*

	Anbefalede ventilationsrater			
	For person $q_p$ $l/(s \cdot person)$	For bygning $q_B$ $l/(s \cdot m^2)$		
		Meget lavt forurenende	Lavt forurenende	Ikke-lavt forurenende
<b>Kategori I</b>	10	0,5	1	2
<b>Kategori II</b>	7	0,35	0,7	1,4
<b>Kategori III</b>	4	0,3	0,4	0,8

## Termisk indeklima – Grundlæggende beregningsmetoder

I de fleste tilfælde bliver det termiske indeklima dimensionsgivende med den største værdi. Der kan anvendes forskellige metoder til at beregne den nødvendige ventilationsluftmængde:

- 1) Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi)
- 2) Døgnmiddelindetemperatur
- 3) Beregninger på timebasis med dynamiske simuleringsprogrammer

De tre metoder vil blive gennemgået i dette kapitel, idet der ikke vil blive lagt så meget vægt på metode 3) Beregninger på timebasis med dynamiske simuleringsprogrammer.

De tre metoder beskrives mere i detaljer i:

- Afsnit 12.13 – Maksimal timemiddelindetemperatur – Metode 1
- Afsnit 12.14 – Døgnmiddelindetemperatur – Metode 2
- Afsnit 12.15 – Dynamiske simuleringsprogrammer – Metode 3

## 12.8. Varmebelastninger

Vurdering af de termiske belastninger har stor betydning for resultatet af varmebalancen, og det er derfor vigtigt at bestemme den så præcist som muligt. Da varmebalance beregningen ofte foregår i en tidlig fase af byggeriet, hvor der kun er begrænset viden om bygningen til rådighed, er den forbundet med en del usikkerhed.

Derfor er det nødvendigt at vurdere belastningerne ud fra et kvalificeret skøn. Dette skøn kan baseres på min/max-værdier for varmebelastningerne, hvorved usikkerhedens indflydelse på beregningen kan vurderes. Hvis varmebelastningerne forøges væsentligt senere i projektet, bør varmebalancen kontrolleres igen.

Energien til rummet fra de termiske varmebelastninger afsættes ved konvektion til luften og ved stråling til overfladerne. Det har betydning at skelne mellem disse to former for varmeoverføring, fordi varmeoverføring til rumluften tidsmæssigt vil give et andet temperaturforløb end varmeoverføring til overfladerne.

Rumluftstemperaturen bliver hurtigt påvirket, når energien transmitteres direkte til rumluften eller ved at ramme lette overflader som f.eks. kontorinventar og derved hurtigt overføres til rumluften. Der vil blive en større temperaturstigning, hvis det meste af energien transmitteres direkte til rumluften i stedet for til de omsluttende overflader. Yderpunkterne er solindfald, som ved stråling kun tilføres overfladerne, og indblæsning af ventilationsluft, der direkte blandes med rumluften.

Hvis energien fra den termiske varmebelastning i stedet rammer varmeakkumulerende overflader vil en del af energien transmitteres ind i bygningskonstruktionen og blive varmeakkumuleret der, og kun en mindre del bliver overført til rumluften. Dette vil have en temperaturstabiliserende virkning, og derfor reducere temperaturudsvingene.

I forhold til de øvrige usikre forudsætninger er det nøjagtigt nok at fordele varmeoverførslen ved konvektion og stråling efter skøn. For de fleste lavtemperatur varmekilder, som f.eks. personer, er det et godt skøn at fordele halvdelen afgivet som konvektionsvarme og den anden halvdel som strålevarme.

I det følgende vil de termiske belastninger blive beskrevet nærmere, idet der skelnes mellem interne og eksterne varmebelastninger.

### *Interne varmebelastninger:*

- Personer
- Belysning
- Elektriske apparater

### *Eksterne varmebelastninger:*

- Solindfald

## 12.9. Interne varmebelastninger – Udstyr, personer

I forbindelse med beregninger af det termiske indeklima er det af stor betydning at have nogle fornuftige input data. I en tidlig designfase kan det være forbundet med problemer at kende de eksakte forhold for det pågældende byggeri. Det kan derfor være en udfordring at finde passende værdier til anvendelse. Dette har den nye (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) bidraget til at forenkle. I denne vejledning er der kommet forslag til en række generelle data, der kan anvendes i beregningerne. Dette har den fordel, at de anvendte data til de enkelte beregninger bliver mere standardiserede.

### Personer

Varmebelastning fra personer til rummet består af den frie varmeafgivelse, der består af varmetabet ved konvektion og stråling. For lave lufthastigheder er de konvektive og strålingsmæssige varmetab nogenlunde lige store. Den bundne varmeafgivelse i form af fugt vil ikke indgå i varmebalancen, med mindre der forekommer kondens på kolde overflader. Som håndregel benyttes ved varmebalanceberegninger en varmebelastning på 100 W per person og børn sættes til 60 W per person. Tallene i det følgende er primært baseret på (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).

For at forenkle beregningerne, antages det at personerne har almindeligt kontorarbejde svarende til et aktivitetsniveau svarende til 1,2 met. Denne værdi kan dog også anvendes på skoler. Et aktivitetsniveau på 1,2 met vil for en gennemsnitlig dansk mand resultere i:

- Fri varmeafgivelse: 100 W (denne værdi indgår i varmebalancen)
- Bunden varmeafgivelse (fugt): 43 W (denne værdi indgår ikke i den normale varmebalance; men skal vurderes i forhold til en evt. fugtbalance eller varmegenvinder med fugtgenvinding)

I beregninger sættes alle personer i skoler til at være voksne.

I vuggestuer og børnehaver regnes der med et højere aktivitetsniveau og dette sættes til 1,6 met med en varmeafgivelse på 60 W per barn.

For det atmosfæriske indeklima regnes der med en CO<sub>2</sub> produktion på:

- 1 met svarende til 17 l/h pr. person
- 1,2 met svarende til 20,4 l/h pr. person
- Børn i børnehaver og vuggestuer svarende til 12,2 l/h pr. person

### Udstyr og Belysning

Den interne varmebelastning fra belysning afhænger meget af hvilken type belysning, der benyttes. Tidligere blev glødelamper anvendt i stor stil og gav anledning til en stor varmebelastning i relation til det belysningsniveau, der blev opnået. Ved fremkomsten af LED belysning er der fremkommet meget store besparelser på den interne varmebelastning fra belysning.

Belysning bliver normalt dimensioneret til at dække behovet i de mørke timer; men ofte vil lyset også være tændt i de lyse timer, selvom der ikke er behov for det. Når lyset først er blevet tændt, vil det ofte forblive tændt resten af dagen. Det er derfor vigtigt, at der for belysningen er censorer, der registrerer belysningsniveauet i rummet og/eller bevægelsessensorer, således at belysning kan blive slukket, hvis der ikke er behov for det. I mange tilfælde er det tilladeligt ved undersøgelse af det termiske indeklima at regne med en reduktion i belysningseffekten i de lyse timer i forhold til den dimensionerende effekt. Ved anvendelse af dynamiske simuleringsprogrammer vil der være mulighed for at indlægge styringsparametre i beregningerne, således at lyset automatisk bliver slukket. Ved anvendelse af forenkledede time- eller døgnmiddel temperatur metoder (metode 1 og 2) må antallet af timer almen belysningen er tændt bero på et skøn. I mange tilfælde udgør belysning en usikkerhedsfaktor i de forenkledede metoder, eftersom det er et skøn, hvorvidt belysning er tændt eller slukket.

I Tabel 12-3 er varmeafgivelsen fra udstyr og belysning vist. Denne tabel kan anvendes som inspiration. Et mere detaljeret kendskab til de fremtidige lokaler med deres mere eksakte valg af produkter vil kunne give en mere nøjagtig værdi. I tillæg skal opmærksomheden henledes på, at der vedvarende foregår en videreudvikling af produkter med henblik på en lavere varmeafgivelse. Der kan derfor findes mere præcise værdier ved at søge på nettet eller tage kontakt til aktuelle leverandører.

Effektafgivelsen pr. arbejdsstation bør for den samlede effektafgivelse ikke sættes lavere end 80 W.

*Tabel 12-3 Intern varmebelastning fra udstyr og belysning.  
(Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

Apparat	Effekt
Almen belysning, LED	4-6 W/m <sup>2</sup>
Almen belysning, lysstofrør	6-8 W/m <sup>2</sup>
Arbejdslampe	5-15 W
Beregnings-PC	60-100 W
Bordprinter	20 W
Kopimaskine	250 W
PC-fladskærm, ny	25 W
Printer	100 W
Projektor	250 W
Smartboard	175 W (stand by 10 W)
Standard PC, bærbar/stationær	30 W
Tablet PC/ iPad	10 W

## Indeklima- og energiberegninger

Det er vigtigt at være opmærksom på, at der er stor forskel på at lave beregninger af det termiske indeklima og energiforbruget på årsbasis. Ved beregning af det termiske indeklima er det de dimensionerende forudsætninger for det termiske indeklima, der optræder i forbindelse med maksimal belastning. Ved beregning af energiforbrug på årsbasis er det vigtigt at anvende en intern varmebelastning, der kan forventes at afspejle det gennemsnitlige forbrug i løbet af et år. Der er med andre ord tale om to væsentlige forskellige indgangsdata til beregningerne:



- Indeklimaberegninger: anvendelse af dimensionerende maksimale forudsætninger for den maksimale interne varmebelastning
- Energiberegninger: anvendelse af gennemsnitlig forventet belastning på årsbasis

#### Indeklimaberegninger

I dette kapitel om bygningsdynamik er det de temperaturmæssige forhold for det termiske indeklima, der er i fokus, og det er derfor punkt 1, der fokuseres på i denne beskrivelse. Præcise antagelser om de interne varmebelastninger har betydning i forbindelse med dimensioneringen af bygningens systemer. Det er et ønske at få den bedste beregning af anlæggene, da et overdimensioneret anlæg vil være dyrt i indkøb, og et underdimensioneret anlæg ikke vil være i stand til at opfylde det termiske indeklima. Anlægget skal dimensioneres til at kunne klare den typiske belastning og i tillæg være i stand til at give et godt indeklima i de termiske spidsbelastninger. Anlæg skal ikke kunne klare de ekstreme spidsbelastninger, som kun optræder meget få gange om året.

#### Energiberegninger

Ved energiberegninger anvendes den gennemsnitlige forventede belastning på årsbasis. Det er vigtigt ikke at benytte belastninger til indeklimaberegninger, da resultatet meget let kan blive et helt urealistisk lavt energiforbrug, som ikke kan opfyldes i praksis. Det er i tillæg nødvendigt at sætte den forventede inde temperatur korrekt, og ikke indsætte en referenceværdi på 20 °C uden en konkret vurdering.

#### Samtidighed og brugsprofiler

Dette afsnit om ”Samtidighed og brugsprofiler” er baseret på (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) og er relevant, når der foretages beregninger af det termiske indeklima. Her har størrelse, samtidighed og brugerprofil for de interne termiske belastninger stor betydning.

Samtidigheden angives med tre niveauer:

- Høj samtidighed
- Almindelig samtidighed
- Lav samtidighed

I den tidlige fase af projekteringen, hvor detaljerede data ikke er til rådighed, kan disse samtidighedsfaktorer anvendes. I de følgende tabeller gælder, at der er forslag til belastningsprofiler og samtidigheder (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017). For at få en ide om hvor påvirkelig bygningen er over for de forskellige samtidigheder, kan der laves analyser, hvor der anvendes alle tre grader af samtidighed, hvormed der opnås en ide om bygningens robusthed under forskellige forhold.

Der er medtaget fire kombinationer af lokaler:

- Tabel 12-4 – Flerpersonerskontor
- Tabel 12-5 – Enkeltmandskontor
- Tabel 12-6 – Mødelokaler
- Tabel 12-7 – Klasselokaler

Bemærk, at forslagene til belastningsprofiler og samtidigheder ikke inkluderer almen belysning.

Tabellerne i det følgende med Samtidighedsprofiler er vist med både time og klokkeslæt.

Hvordan time og klokkeslæt skal sættes i forhold til hverandre er illustreret på Figur 12-2. På tabellerne Tabel 12-4 til Tabel 12-7 er benyttet time 1 gående fra kl. 0 til kl. 1. En anden måde at beskrive sammenhængen kan være at time 0 gående fra kl. 23.30 til 00.30 og time 1 gående fra kl. 00.30 til kl. 1.30. Denne forskel kan være relevant, når der sammenlignes med solindfald, hvor metoden for registrering af solindfald afhænger af den valgte metode.

### *Flerpersonerskontor*

Når flere personer anvender et kontor, vil der ofte være nogle af personerne, der ikke er tilstede i kontoret, og flerpersonekskontor er derfor ikke fuldt belastet. Når det termiske indeklima skal dimensioneres, er det ikke tilstrækkeligt at benytte den gennemsnitlige belastning, som benyttes til energiberegninger. Det er nødvendigt at dimensionere for en større værdi.

for flerpersonekskontor er der lavet følgende forudsætninger:

- Antal arbejdspladser
  - Det antages, at der er 6-10 m<sup>2</sup> pr. arbejdsplads inkl. gangarealer i lokalet
  - (Dansk Standard, 2007a) benytter 15 m<sup>2</sup> pr. arbejdsplads for storrumskontorer
  - Indretningsplaner kan også danne grundlag for vurdering af antal arbejdspladser
- Intern varmebelastning per arbejdsplads
  - 1 Person
  - 1-2 skærme
  - 1 PC
  - Evt. 1 arbejdslampe

*Tabel 12-4 Samtidighedsprofil for flerpersonekskontor.  
Modificeret fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-7	8	9	10-11	12	13-15	16	17	18-24	SUM
	Kl.	0-7	7-8	8-9	9-11	11-12	12-15	15-16	16-17	17-24	
<b>Høj</b>	person	0	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	0	8,5
	udstyr	0	0,5	1	1	1	1	1	0,5	0	9
<b>Almindelig</b>	person	0	0,4	0,8	0,8	0,4	0,8	0,8	0,4	0	6,8
	udstyr	0	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0	7,2
<b>Lav</b>	person	0	0,35	0,7	0,7	0,35	0,7	0,7	0,35	0	5,95
	udstyr	0	0,35	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,35	0	6,3

### Enkeltmandskontor

Der gøres den antagelse, at når der opholder sig en person i et enkeltmandskontor, er dette 100 % belastet i de angivne perioder.

Det antages, at den interne varmebelastning pr. arbejdsplads er følgende:

- Intern varmebelastning pr. arbejdsplads
  - 1 Person
  - 1-2 skærme
  - 1 PC
  - Evt. 1 arbejdslampe

I Tabel 12-5 er der forslag til belastningsprofiler og samtidigheder.

*Tabel 12-5 Samtidighedsprofil for enkeltmandskontor.  
Modificeret fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-7	8	9	10-11	12	13-15	16	17	18-24
	Kl.	0-7	7-8	8-9	9-11	11-12	12-15	15-16	16-17	17-24
<b>Høj</b>	Person	0	1	1	1	0,5	1	1	1	0
	Udstyr	0	1	1	1	1	1	1	1	0
<b>Almindelig</b>	Person	0	0	1	1	0,5	1	1	0	0
	Udstyr	0	0	1	1	1	1	1	0	0
<b>Lav</b>	person	0	0	0	1	0,5	1	0	0	0
	udstyr	0	0	1	1	1	1	0	0	0

### Mødelokaler

Et mødelokale vil normalt ikke være fuldt optaget hele arbejdsdagen. Mindre mødelokaler vil i mange tilfælde være mere optaget og dermed have en større belastningsprocent.

I Tabel 12-6 for mødelokaler er der lavet følgende forudsætninger:

- Antal arbejdspladser
  - Det antages at der er 2-3 m<sup>2</sup> pr. mødedeltager
  - (Dansk Standard, 2007a) benytter 2 m<sup>2</sup> pr. mødedeltager (conference room)
  - Indretningsplaner kan også danne grundlag for vurdering af antal personer
- Intern varmebelastning i mødelokaler
  - 1 bærbar PC til minimum halvdelen af mødedeltagerne
  - 1 projektor eller storskærm (TV)

I Tabel 12-6 er der forslag til belastningsprofiler og samtidigheder.

*Tabel 12-6 Samtidigedsprofil for mødelokaler for personer og udstyr.  
Modificeret fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-8	9-10	11	12-13	14	15-16	17-24
	Kl.	0-8	8-10	10-11	11-13	13-14	14-16	16-24
<b>Høj</b>	person	0	1	0,5	1	0,5	1	0
	udstyr	0	1	0,5	1	0,5	1	0
<b>Almindelig</b>	person	0	0,75	0,375	0,75	0,375	0,75	0
	udstyr	0	0,75	0,375	0,75	0,375	0,75	0
<b>Lav</b>	person	0	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0
	udstyr	0	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0

### *Klasselokaler*

Folkeskoleloven stiller krav om, at der i en skoleklasse maksimalt må være 28 elever. Denne regel gælder fra børnehaveklasse til 9. klasse. Det vurderes, at der er to undervisere pr. klasse. I tillæg kræver bygningsreglementet, at der skal være et rumindhold på minimum 6 m<sup>3</sup> per person.

I Tabel 12-7 for klasselokaler er der lavet følgende forudsætninger:

- Antal arbejdspladser
  - 28 elever og 2 lærere = 30 personer
  - (Dansk Standard, 2007a) benytter 2 m<sup>2</sup> per person for klasselokaler
  - Indretningsplaner kan også danne grundlag for vurdering af antal personer
- Intern varmebelastning fra udstyr i klasselokale
  - 1 bærbar PC eller tablet pr. elev
  - 1 stationær PC
  - 1 smartboard med projektor

I Tabel 12-7 er der forslag til belastningsprofiler og samtidigheder. I den originale tabel 27 fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) er der forudsat tre pauser hver på en halv time i løbet af en undervisningsdag. Almindelige programmer benytter inddata på timebasis. I tabellen er den time med indlagt halvtimes pause derfor blevet omsat til en gennemsnitsværdi for hele timen, hvilket er medvirkende til de tre decimaler fremkommer (Bruger kan selv runde 0,675 op til 0,68).

*Tabel 12-7 Samtidigedsprofil for klasselokaler for personer og udstyr. Modificeret fra  
(Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-8	9	10	11	12	13	14	15	16-24
	Kl.	0-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-24
<b>Almindelig</b>	person	0	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0
	udstyr	0	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0
<b>Lav</b>	person	0	0,9	0,675	1	0,675	1	0,675	1	0
	udstyr	0	0,9	0,675	1	0,675	1	0,675	1	0

## 12.10. Eksterne varmebelastninger – Solindfald

Den eksterne varmebelastning fra solindfald kan blive meget stor, og det er afgørende for det termiske indeklima, at der udføres en korrekt beregning af solindfaldet, samt hvorledes uhensigtsmæssigt højt solindfald bliver håndteret. En udvendig solafskærmning har ingen effekt, hvis den ikke bliver brugt. Det kan ikke forventes, at fremtidige brugere af en bygning har den nødvendige forståelse for brugen af den udvendige solafskærmning i forhold til det termiske indeklima. Hvis en solafskærmning kører op og ned til gene for brugerne, kan de træffe foranstaltninger til at bringe den til ophør med at virke. Meget få personer bryder sig om et se ind i en solafskærmning, der helt afskærmer udsynet til omgivelserne – specielt hvis det er mange timer hver dag.

Solstråling på en bygning overføres til lokalerne via ikke-transparente og transparente bygningsdele. De ikke-transparente bygningsdele som vægge, tage, etc. har almindeligvis en lav U-værdi, og derved vil solindfald på disse flader have begrænset effekt. De transparente bygningsdele i form af ruder har en meget effektiv overførsel af solstråling til de bagvedliggende lokaler. Der vil derfor i dette afsnit blive fokuseret på transparente bygningsdele i form af ruder.

Overførsel af solenergi via ikke-transparente bygningsdele har normalt kun betydning for store flader med en høj U-værdi. Dette kan f.eks. være aktuelt for dårligt isolerede lagerhaller med sort asfalt pap på taget, fordi det sorte tagpap absorberer solstrålingen, hvilket resulterer i en høj overfladetemperatur, der resulterer i en stor varmeoverførsel ind i lagerhallen.

Emnet solindfald er stort og komplekst. Målgruppen for dette kapitel er primært ingeniør- og maskinmesterstuderende med forskellig baggrundsviden om solindfald. Der er derfor valgt at medtage det essentielle i dette kapitel og placere noget af den generelle teori i Afsnit Appendiks 12.17 til 12.19.

### Solstråling

Solstråling deles op i tre hovedområder:

- Ultraviolet
- Synligt
- Infrarødt

Når først solstrålingen er kommet ind i lokalet (med hele spektret af ultraviolet, synlig og infrarød solstråling) bidrager den til lokalets varmebalance. Hvorimod kun det synlige lys bidrager til dagslyset i lokalet. Det synlige lys udgør ca. halvdelen (48%) af energien i solstrålingen. For kontorbygninger (og tilsvarende) med overskudsvarme vil der normalt være behov for at begrænse varmetilførslen fra solstråling så meget som muligt, samtidig med at der ønskes så meget dagslys som muligt. Dette er to modstridende krav, som er vanskelige at forene.

Rude producenterne har forsket meget i dette, og er nu i stand til at producere ruder, som afskærmer mere for den ultraviolette og infrarøde solstråling end for den synlige solstråling. Resultatet af dette er, at der i dag kan anskaffes ruder med langt højere sollystransmittans (ultraviolet og infrarød

stråling afskærmes mere end synligt lys) end total solenergi transmittans, se Appendiks 12.17 Tabel 12-21.

Solstrålingen betegnes også som kortbølget stråling og ligger i bølgelængde område fra 0,3  $\mu\text{m}$  til 3  $\mu\text{m}$ . Når solstrålingen går direkte igennem en rude, kommer ind i rummet og rammer en overflade, vil en del af strålingen blive reflekteret videre i rummet som kortbølge stråling. En anden del af strålingen vil blive absorberet af konstruktionen og en del af denne energi vil blive akkumuleret i bygningskonstruktionen. For den absorberede del af energien gælder, at noget vil blive afgivet fra overfladen dels ved konvektion og dels ved emitteret stråling til andre flader. Den emitterede stråling fra overfladen vil nu være omdannet til langbølge stråling, der har nogle andre karakteregenskaber end den kortbølgede stråling. På denne måde opstår den såkaldte drivhuseffekt, hvor solenergien (nu langbølge stråling) bliver fanget inde i rummet.

### *Solindfald på flader*

Der findes i litteraturen et meget stort antal beregningsmetoder og formler til beregning af solindfald, og solindfald på flader og gennem ruder.

I dynamiske simuleringsprogrammer er der i mange tilfælde en valgmulighed mellem forskellige metoder, som vil give forskellige resultater. I BSim er der fire modeller at vælge mellem for beregning af solindfald: 1) Petersens solar model, 2) Muniers solar model, 3) Lunds solar model, 4) Perezs solar model. Det beregnede solindfald vil således ikke være en eksakt størrelse; men afhænge af den valgte størrelse. Herudover vil de valgte vejrdata på årsbasis også være af afgørende betydning. Disse vejrdata er blevet ændret med tiden på baggrund af de forandrede klimaforhold, der er et resultat af den globale opvarmning.

I dette kapitel gennemgås varmebalancen ved brug af døgnmiddelindetemperaturen og i denne sammenhæng er valgt at anvende sol data baseret på (DANVAK, 2006). Disse soldata er symmetriske om time 12 (kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid), hvorved solindfaldet har samme størrelsesorden for øst og vest, se Afsnit Appendiks C 12.19 Tabellerne

Tabel 12-22 til Tabel 12-30. Der kan imidlertid godt anvendes andre soldata, der ikke nødvendigvis er symmetriske omkring time 12.

Dette i modsætning til anvendelse af reference år, der er baseret på målte værdier, se Afsnit 12.11 om referenceår. Dette kan resultere i, at der kan være markant forskel for en given skyfri dag på solindfaldet på en vest og østvendt facade. Dette er en faktor, der kan resultere i, at for en bygning med identiske rum mod øst og vest kan de nødvendige luftmængder blive forskellige på baggrund af denne forskel i solindfaldet. En forskel som ikke nødvendigvis er reel.

Solens position på himmelhvælvingen angives med solhøjden og solazimut. Solens placering på himmelhvælvingen har indflydelse på, hvorledes solens stråler rammer en flade. Orienteringen af en flade angives ved dens hældning med vandret og facadeazimut, der er vinklen mellem den lodrette normal plan for fladen og den lodrette plan gennem syd retningen. Solens position og hvorledes dens stråler rammer en flade er beskrevet i Afsnit Appendiks 12.17.

### *Forskellige typer solstråling*

Ved solindfald på en flade skelnes mellem direkte og diffus stråling. Den direkte stråling kan betragtes som kommende fra solen, som udgør en punktformig kilde, der bevæger sig henover himmelhvælvingen. Den diffuse stråling består dels af diffus himmelstråling og dels af reflekteret diffus stråling fra omgivelserne.

Den direkte solindstråling mod en overflade er først og fremmest afhængig af solens højde på himlen og strålernes indfaldsvinkel. På en skyfri dag udgør den direkte stråling fra solen op til ca. 90 % af totalstrålingen.

Følgende fire begreber er vigtige i forbindelse med beregning af solindfald:

- **Indfaldsvinkel** Indfaldsvinklen er vinklen mellem den direkte solstrålingsretning og fladens normal, dvs. det er en linje, der står vinkelret på fladen.
- **Direkte solstråling** Den direkte solstråling er den del af solstrålingen, der kommer direkte fra solen uden at være blevet spredt i atmosfæren.
- **Diffus solstråling** Den diffuse solstråling er den del af solstrålingen, der spredes i atmosfæren og derfor ikke kommer direkte fra solskiven, men fra andre steder på himmelhvælvingen.
- **Reflekteret solstråling** Den reflekterede solstråling er den del af solstrålingen, der rammer jordoverfladen og andre objekter og kastes tilbage herfra.

### *Sand soltid – Klokkeslæt, time numre*

Inden soltransmission gennem vinduer gennemgås vil begrebet *sand soltid* blive omtalt.

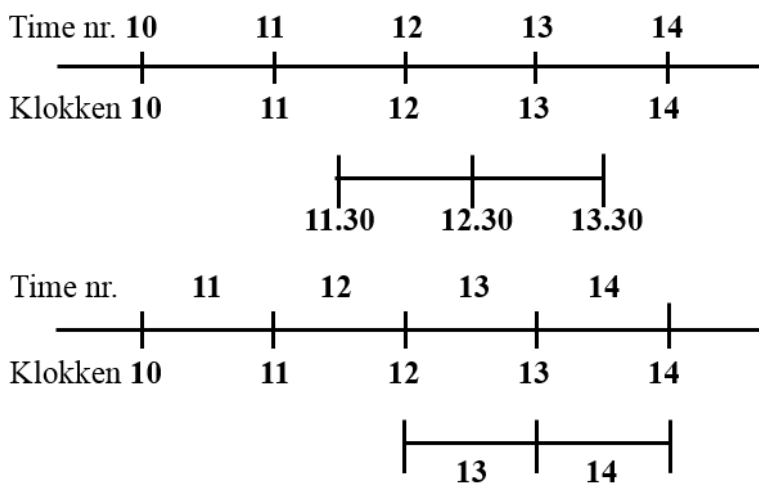
Det er vigtigt at have en forståelse for at skelne mellem sand soltid og klokkeslæt. Om vinteren er klokkeslættet identisk med sand soltid, således at kl. 8 sand soltid er det samme som klokkeslættet kl. 8. Når sommertiden er indført svarer kl. 8 sand soltid til klokkeslættet kl. 9. I figurer for



solindfald gennem referencerude (DANVAK, 2006), Tabeller i Afsnit Appendiks 12.19 og i TCD programmet (Christensen, 2018) anvendes sand soltid.

Strengt taget gælder figurerne for solindfald for længdegrad 15°Ø, svarende til Bornholm. Hvis solen således står i syd kl. 12 på Bornholm ((15°Ø) vil den først stå i syd kl. 12.11 i København og kl. 12.25 i Esbjerg.

Desuden er det vigtigt at skelne mellem time nummer og klokkeslæt, og hvorledes tidsintervaller er inddelt i forhold til klokkeslæt, se Figur 12-2.



*Figur 12-2 Øverst – Tidsintervaller gående fra det ene klokkeslæt til det andet.  
Nederst – Tidsintervaller centreret omkring hele klokkeslæt*

I (DANVAK, 2006) og dermed TCD programmet angives reelt timer, f.eks. time 8 er fra kl. 7.30 til 8.30 sand soltid. Når der for eksempel i TCD programmet indsættes, at der er en solafskærmning aktiveret fra time 8 til time 11, skal det i virkeligheden forstås på den måde, at den er aktiveret fra kl. 7.30 sand soltid til kl. 11.30 sand soltid.

For det nye Design Reference Year for Danmark, "DRY Danmark 2013" (perioden 2001-2010) (Wang et al., 2012) gælder det, at time 1 er i tidsrummet fra kl. 0 til kl. 1. Programmet BSim benytter breddegrad 55,793°N og længdegrad 12,16°Ø, se afsnit 12.11. Dette svarer til en tidsforskel i forhold til længdegrad 15°Ø på 11 minutter.

## Ruder

En vigtig del af en bygnings klimaskærm er vinduer, som har til formål at beskytte mod udeklimaet i kombination med at skabe udsyn og få dagslys ind i lokalet. Vinduer vil ikke blive beskrevet nærmere i dette kapitel, idet der henvises til relevant litteratur. Fokus vil i stedet for være på ruder med deres tilhørende solindfald og bidrag til rummets varmebalance.

### *Soltransmission gennem glastrude*

Når solstråling rammer en glastrude, bliver en del reflekteret ( $\rho$ ), en del absorberet ( $\alpha$ ) og en del transmitteret ( $\tau$ ). Størrelsen af  $\rho$ ,  $\alpha$  og  $\tau$  er afhængig af glastype, vindueskonstruktion, indfaldsvinkel og strålingens spektralfordeling. For vinkler mellem  $0^\circ$  og  $40^\circ$  er transmittansen næsten konstant, hvorimod transmittansen aftager meget ved større indfaldsvinkler, Afsnit Appendiks 12.18 Figur 12-15.

En del af den stråling, der rammer ruden, vil blive reflekteret bort og ikke indgå i varmebalancen for det bagvedliggende rum. En del af strålingen vil blive absorberet i glaslagene, hvoraf en del af denne energi vil blive tilført rummet, og en anden del vil blive afgivet til det fri og ikke indgå i rudens varmebalance.

### *Soltransmission gennem standard dobbeltrude*

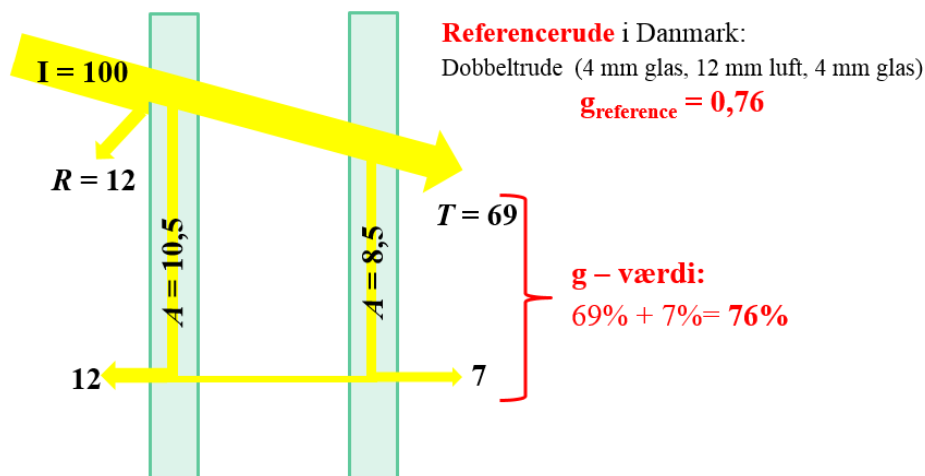
For et vindue med en standard dobbeltrude transmitteres 76 % af solenergien, hvilket svarer til en  $g$ -værdi på 0,76. Figur 12-3 illustrerer, hvordan denne solstråling bliver transmitteret, hvordan  $g$ -værdien fremkommer som en sum af den direkte transmitterede solstråling på 69 % og den absorberede solstråling, som afgives indad til rummet på 7 %.

Denne standard dobbeltrude bliver brugt som **reference rude** og er kendetegnet med følgende egenskaber:

- 4 mm floatglas – 12 mm luftmellemrum – 4 mm floatglas  
Transmissionsfaktor for solenergi på 0,76 ( $g$ -værdi, solfaktor) :  $g_{reference} = 0,76$

Ved maksimal indstråling lader ruden op til  $600 \text{ W/m}^2$  passere, og der er således tale om meget store effekter. Den maksimale indstråling optræder på forskellige tidspunkter af året og dagen i afhængighed af rudens orientering. For øst- og vestvendte ruder optræder det største solindfald om sommeren, hvorimod det for sydvendte sker i marts og september.

Solindfaldet gennem en standard dobbeltrude med forskellige orienteringer er vist i Afsnit Appendiks 12.19 for den direkte stråling og den diffuse himmelstråling med data fra (DANVAK, 2006). Det er denne standard dobbeltrude, som er benyttet som reference rude i (DANVAK, 2006) og i TCD programmet (Christensen, 2018).



Figur 12-3 Transmitteret solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude (2 lag 4 mm glas med 12 mm luftmellemrum) med en g-værdi på 0,76

Tabellerne er beregnet for skyfri dage med deraf følgende maksimal solbelastning. Tabellerne er baseret på (DANVAK, 2006), og der er regnet med den 21. i hver måned for at gøre det muligt at have to orienteringer på hver kurve. Dette medfører at f.eks. forårsjævndøgn 21. marts og efterårsjævndøgn 21. september er på identiske kurver. Tilsvarende gælder for de øvrige parrede måneder: december, januar/november, februar/oktober, september/marts, april/august, maj/juli, juni.

Tabellerne for transmitteret direkte sol stråling i Afsnit Appendiks 12.19 er opgivet for orienteringer i spring på 45 grader – i alt 8 retninger: syd, sydvest, vest, nordvest, nord, nordøst, øst, sydøst.

Der regnes med sommertid, hvilket betyder for eksempel at klokken 13 svarer til kl. 12 sand soltid (der trækkes en time fra klokkeslettet). Normalt regnes der med, at værdien er gældende i en hel time rundt om klokkeslettet, f.eks. kl. 12 sand soltid gælder fra kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid.

Beregning af solindfald på timebasis gennem et givet vinduesareal gennemgås i afslutningen af dette afsnit efter gennemgang af de øvrige emner herunder solafskærmning.

## Rudetyper

Rudens egenskaber kan ændres efter behov afhængigt af om det er en reduktion af solindfaldet, der ønskes eller en forbedring af isoleringsevnen. Hvis lys- eller solindfald ønskes ændret, kan det ske med absorberende glas eller belægninger.

Det glas, der sædvanligvis anvendes i forbindelse med ruder, er floatglas. Dette indeholder normalt jernoxid i meget små mængder, hvilket er med til at give glasset et grønligt skær, når der ses på kanten af glasset. Ved at sænke indholdet af jernoxid bliver glasset klarere. Glassets egenskaber kan ændres ved at iblande diverse metaloxider, og dette kan bruges til at reducere lystransmittansen samt ændre farven på glasset.

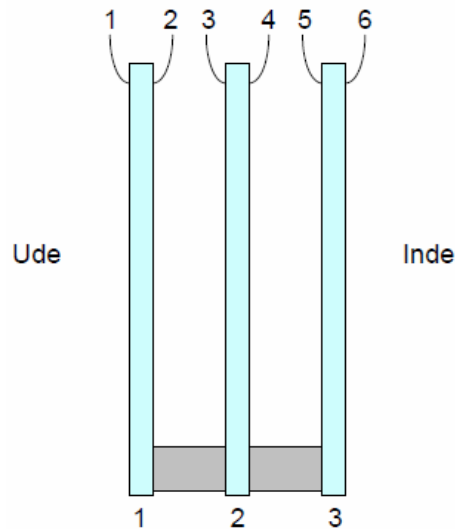
Der har været en rivende udvikling af glassets egenskaber, hvilket har medført at vinduer kan anvendes på en bedre måde. Der er blevet udviklet funktionsglas, som kan løse en lang række krav:

- Kontrol med energi
- Kontrol med dagslys
- Støjdæmpning
- Brandbeskyttelse
- Selvrengøring

Specielt har udviklingen af ruder med en højere transmittans for dagslys end solenergi bidraget til nye muligheder. Det er muligt at vælge en glaskombination med et stort antal valgmuligheder, der er med til at karakterisere den enkelte rudetype:

- 1, 2, 3, 4 lag glas
- Tykkelse af det enkelte lag glas
- Glasafstand
- Gasart i luftmelletrum: luft, argon, krypton
- Belægning, placering af lavemissions- eller solafskærmende belægning
- Laminering
- Hærdning

I forbindelse med karakteristik af raders opbygning anvendes en nummerering af de enkelte glasoverflader og glaslag, angivet udefra og indefter, se Figur 12-4.



*Figur 12-4 Glaslag og glasoverflader nummereres udefra og indefter*

I Tabel 12-8 og Tabel 12-9 er der en oversigt over de mest almindelige ikke-solafskærmende rudetyper samt de mest almindelige solafskærmende rudetyper. For nærmere information henvises de respektive producenters materiale.

### *Gasser*

Normalt er der luft mellem glassene. Ved anvendelse af forseglede ruder er det muligt at benytte andre ædelgas typer som argon, krypton eller xenon. De sidstnævnte tre gasarter er alle tungere end luft, og dette medfører en øget træghed i gassens bevægelighed i forhold til luft. Dette er med til at reducere den konvektive varmetransmission igennem mellemrummet mellem glassene, og dermed varmetabet gennem ruden. Ved fremstilling af ruder er ædelgasser dyrere end anvendelse af luft. Til gengæld opnås et lavere varmetab og dermed en lavere U-værdi.

### *Belægninger*

Ruder anvendes til mange formål og i nogle tilfælde er det ønskeligt at have en rude med et meget lavt varmetab. I andre tilfælde ønskes en solafskærmende virkning for at undgå overtemperaturer i lokalet. Af denne årsag påføres glassene belægninger for således at ændre rudens termiske egenskaber. Anvendelse af belægninger kan inddeles i følgende kategorier:

- Lavemissions belægning – formål at reducere varmetab
- Solafskærmende belægning – formål at reducere solindfald
- Lavemissions belægning og solafskærmende belægning – formål at reducere varmetab og solindfald

En ulempe ved anvendelse af belægninger er at de reducerer transmittans af solstråling og dagslys gennem ruden til rummet.

#### *Lavemissions belægninger*

Formålet med lavemissions belægninger er at reducere varmetabet ved varmestråling (langbølget stråling). Varmetabet ved stråling udgør ca. 2/3 af varmetabet gennem en termorude. Ved at påføre lavemissions belægninger i et tyndt lag på overfladerne af glassene kan varmestrålingen reduceres betragteligt. Lavemissions belægninger kan være af to typer:

- Blød belægning – sårbar, kan kun anvendes i forseglede ruder på indre overflader, position 2-5 på *Figur 12-4*.
- Hård belægning – kan tåle vejrmæssig påvirkning, emissionsforhold er lidt højere end blød belægning, hvilket giver lidt mindre effektivitet.

#### *Solafskærmende belægninger og glas*

I mange bygninger med stor intern varmebelastning vil der være behov for at reducere solindfaldet for at undgå for høje temperaturer. Her kan med fordel anvendes solafskærmende belægninger eventuelt i kombination med en afskærmning. Der forefindes følgende slags:

- Variant som reflekterer og absorberer solstrålingen, hvilket reducerer transmission af solstråling og sænker dagslysindfaldet – virker generelt spejlende

- Variant, som primært reflekterer det infrarøde og ultraviolette spektrum. På denne måde reduceres varmeindstrålingen fra solstrålingen uden at dagslyset reduceres særligt meget. Denne variant har dermed en højere sollystransmittans end solenergitransmittans. Glasset kan være klart.
- Gennemfarvet glas

Valg af solafskærmende glas afhænger af hvilke ønsker der prioriteres. Er der æstetiske krav, hvor glassets farve har betydning, kan de ønskede gennemfarvede glas vælges.

Herudover er det af betydning, hvor lav en soltransmittans i form af lav g-værdi som ønskes. Denne værdi skal ses i forhold til ønsket om en høj dagslysindstråling, og i de fleste tilfælde er det ønskeligt med en højere lys transmittans end solenergi transmittans. Det er i dag muligt at få ruder med f.eks. en dagslys transmittans på 72% og en solenergi transmittans på 43%, hvilket giver helt nye muligheder for anvendelse af ruder i byggeriet – find aktuelle leverandører på markedet for at få information om de sidste nye rudetyper på markedet., se Tabel 12-8 og Tabel 12-9. Ved design af kontorbyggeri vil der være et overskud af intern og ekstern varmebelastning, og det vil derfor være ønskeligt at reducere solenergi transmittansen så meget som muligt, uden at dagslys transmittansen bliver reduceret nævneværdigt. Dette giver også nogle nye muligheder i forbindelse med vurdering af udvendig solafskærmning i forhold til solafskærmende glas.

*Tabel 12-8 Oversigt over de mest almindelige ikke-solafskærmende rudetyper på markedet med angivelse af varmetransmissionskoefficient, sollystransmittans og total solenergitransmittans.*

*Varmetransmissionskoefficienten er angivet for tre luftarter. Argon90 og krypton90 er en blanding af 90% argon hhv. krypton og 10% luft. Den totale solenergitransmittans er angivet i tilfældet med luftfyldning, men er næsten uafhængig af gasfyldningens type*

Rudetype	Antal Glas	Belægning	Termiske data			Optiske data	
Glastykkelse og afstand		Belagt overfalde talt udefra	U-værdi			Dagslys	Solenergi
			$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)			LT, $\tau_t$	g
Type 1,2,3		Position	Luft	Argon90	Krypton90	%	%
<b>Almindeligt floatglas</b>							
4	1		5,8			0,90	0,86
4-12-4	2		2,9	2,7		0,82	0,76
4-12-4-12-4	3		1,9	1,8		0,74	0,68
<b>Almindeligt floatglas + *Energiglas (type 1, 2, 3)</b>							
4-koblet- *4(1)	2	3	1,8			0,75	0,71
4-12-4-koblet- *4(1)	3	5	1,3			0,69	0,63
4-12- *4(1)	2	3	1,9	1,6	1,5	0,75	0,71
4-15- *4(1)	2	3	1,7	1,5	1,5	0,75	0,71
4-24- *4(1)	2	3	1,7	1,5	1,5	0,75	0,71
4-12- *4(2)	2	3	1,8	1,5	1,3	0,77	0,66
4-15- *4(2)	2	3	1,6	1,3	1,3	0,77	0,66
4-24- *4(2)	2	3	1,6	1,4	1,4	0,77	0,66
4-15- *4(3)	2	3	1,4	1,1	1,1	0,75	0,63
6-15- *6(2)	2	3	1,6	1,3		0,75	0,63
*4-15-4(2)	2	2	1,6	1,3		0,77	0,61
4-12-4-12 *4(2)	3	5	1,4	1,1		0,70	0,59
4-15-4-15 *4(3)	3	5	1,1	0,9	0,8	0,68	0,53
*4-12-4-12 *4(3)	3	2 + 5	0,8	0,6	0,5	0,62	0,40

Energiglas er betegnelsen for glas med en emissivitet  $\varepsilon < 0,2$   
 Energiglas type 2: Blød lavemissionsbelægning  $\varepsilon = 0,1$

Energiglas type 1: Hård lavemissionsbelægning  
 Energiglas type 3: Blød lavemissionsbelægning  $\varepsilon = 0,04$

*Tabel 12-9 Oversigt over de mest almindelige solafskærmende rudetyper på markedet med angivelse af varmetransmissionskoefficient, sollystransmittans og total solenergitransmittans.*

*Varmetransmissionskoefficienten er angivet for tre luftarter. Argon90 og krypton90 er en blanding af 90% argon hhv. krypton og 10% luft. Den totale solenergitransmittans er angivet i tilfældet med luftfyldning, men er næsten uafhængig af gasfyldningens type*

Rudetype	Antal Glas	Belægning	Termiske data			Optiske data	
Glastykkelse og afstand		Belagt overfalde talt udefra	U-værdi			Dagslys	Solenergi
			U <sub>g</sub> (W/m <sup>2</sup> K)			LT, τ <sub>t</sub>	g
Type 1,2,3		Position	Luft	Argon90	Krypton90	%	%
<b>Solafskærmende glas (gennemfarvet) + *Energiglas (type 2)</b>							
6 grå-15-*6(2)	3	3	1,6	1,3		0,36	0,37
6 grøn-15-*6(2)	3	3	1,6	1,3		0,63	0,39
<b>Solafskærmende glas (belagt) + *Energiglas (type 2)</b>							
6 silver-15-*6(2)	3	3	1,5	1,3		0,17	0,17
6 blå-15-*6(2)	3	3	1,5	1,3		0,26	0,22
6 grå-15-*6(2)	3	3	1,5	1,3		0,27	0,27
<b>Solafskærmende glas (belagt inkl. energibelægning) + Almindeligt floatglas</b>							
4 klar-15-4	3	2	1,4	1,1		0,65	0,44
6 klar-15-6	3	2	1,4	1,1		0,65	0,44
6 neutral-15-6	3	2	1,6	1,3		0,54	0,44
6 silver-15-6	3	2	1,4	1,1		0,41	0,27
<b>Solafskærmende glas (belagt inkl. energibelægning) + Energiglas (type 2)</b>							
6 klar-15-*6(2)	3	2 + 3		1,1	1,1	0,61	0,39
6 klar-12-4-12-*6(2)	4	2 + 5		0,8	0,6	0,55	0,36
<b>Solafskærmende glas (gennemfarvet) + Solafskærmende glas (belagt inkl. energibelægning)</b>							
6 grå-15-klar 4	3	3	1,4	1,1		0,31	0,30
6 grå-15-silver 6	3	3	1,4	1,1		3,20	0,22
6 grøn-15-klar 4	3	3	1,4	1,1		0,54	0,32
6 grøn-15-silver 6	3	3	1,4	1,1		0,35	0,23

Energiglas er betegnelsen for glas med en emissivitet  $\varepsilon < 0,2$

Energiglas type 2: Blød lavemissionsbelægning  $\varepsilon = 0,1$

Energiglas type 1: Hård lavemissionsbelægning

Energiglas type 3: Blød lavemissionsbelægning  $\varepsilon = 0,04$



## *Rudens egenskaber*

Energiglas opnås ved at påføre glasset et selektivt lag, hvor kortbølget solstråling bliver transmitteret, og en større del af den langbølgede varmestråling fra rummet bliver reflekteret, således at rumvarmen bliver i lokalet.

Hvis lys- eller solindfald ønskes ændret, kan det ske med absorberende glas eller belægninger. Ruderne inddeles i tre grupper efter hvilke egenskaber de har:

- Solafskærmende ruder
- Lys- og varmeregulerende ruder
- Energiruder

Hvorledes belægningen placeres, er afhængigt af hvilke egenskaber, der ønskes fremhævet. For 2- og 3- lags ruder skelnes der mellem 6 belægningspositioner regnet udefra, med 1 og 2 for belægning udvendigt og indvendigt på det yderste glas etc.

### *Solafskærmende ruder*

For solafskærmende ruder skal belægningen eller filmen være i position 1 eller 2, hvorved hovedparten af den absorberede varme afgives til det fri. Solafskærmende ruder nedsætter ofte lysindfaldet mere end solindfaldet, da halvdelen af energien befinder sig i det synlige område.

En anden form for solafskærmende ruder fremstilles ved at benytte absorberende glas. Dette placeres yderst i termoruden for at hindre så meget som muligt at den absorberende varme i at gå ind i rummet. Effektiviteten af ruden afhænger af dels af mængden af metal oxider (hvor kraftigt ruden er farvet), og dels af glastykkelsen. Det absorberende glas fremstilles ved at tilsætte forskellige oxyder af jern, nikkel, kobber og kobolt til glasmassen.

I de tilfælde, hvor der er installeret ventilations- eller køleanlæg til at fjerne det overskydende solindfald, kan solafskærmende ruder reducere energiforbruget i klimaanlægget.

### *Lys- og varmeregulerende ruder*

Lys- og varmeregulerende ruder har selektive belægninger som muliggør passage af en stor del af dagslyset, hvorimod den usynlige del af solstrålingen reflekteres delvist af belægningen. Dette resulterer i, at ruderne kun bliver svagt toned. Belægningerne placeres i position 1 eller 2 og medfører ofte, at varmestrålingen mellem glassene bliver reduceret, og derved at termoruden bliver bedre isolerende (lavere U-værdi).

### *Energiruder*

Energiruder benyttes hvor der er behov for at udnytte den passive solvarme bedst muligt, samtidigt med at varmetabet til det fri ønskes reduceret mest muligt.

De varmeisolerende egenskaber opnås ved gasfyldning af mellemrum, og ved at placere belægninger, der reducerer varmestrålingen mellem glassene. Belægningen vil altid absorbere en del af solstrålingen, hvorfor den placeres i position 3 (dobbeltruder), således at hovedparten af den absorberede varme tilføres rummet.

### *Valg af ruder med specialglas og belægning*

Når valg af ruder med specialglas og belægning overvejes, bør følgende iagttages:

- Påvirkning af dagslysets farve og udsynet
- Den permanente reduktion af dagslyset og dermed øget brug af kunstig belysning
- Spejlinger og farver udvendigt på facaden
- Spejlinger i rudens inderside, når det er mørkt ude
- Store temperatur gradienter i glasset med fare for brud ved slagskygger
- Farveændringer ved delvis udskiftning til nye ruder i tilfælde af brud
- Rudernes merpris

Og fordelene ved:

- Bedre termisk indeklima
- Besparelser i energiforbrug på grund af forbedret effektiv U-værdi
- Besparelser i anlægsmkostninger og drift af klimaanlæg

### **Solafskærmning**

Siden 2. verdenskrig er "glasarkitekturen" blevet benyttet verden over og har til tider givet anledning til alvorlige indeklima problemer. Disse problemer er blevet forsøgt løst med mere eller mindre hensigtsmæssige solafskærmninger. Imidlertid er der mange bygninger fra denne periode, som er så arkitektonisk raffinerede, at der ikke er plads til solafskærmninger. Dette har medført, at indeklimaet har været så ubehageligt i disse bygninger, at de helst kun skulle betragtes udefra. Blandt de mest berygtede kan nævnes FN-bygningen i New York, UNESCO-Huset i Paris og Sundhedsministeriets bygning i Rio de Janeiro. For at undgå tilsvarende problemer er det en fordel at integrere solafskærmningen i bygningen, hvis der er behov for det.

Det er vigtigt at afskærme for solstråling for at reducere solindfaldet gennem vinduerne, og dette gøres ved at benytte forskellige typer solafskærmninger. En solafskærmning giver bedre termisk indeklima samt formindsker den eksterne varmebelastning, hvilket reducerer energibehovet for køling og ventilation. Ligeledes vil blænding blive elimineret, og således skabes en bedre optisk komfort.

I nyere kontorbygninger har automatiske afskærmninger, der styres efter solindfaldet og ude-/indetemperaturen i højere grad vundet indpas. Disse afskærmninger har den store fordel at de automatisk bliver koblet til, når der er behov for det. Dette har stor betydning, idet det alt for ofte sker at solafskærmningen tages i funktion for sent, efter at solvarmen er kommet ind i lokalet og er blevet akkumuleret af bygningskonstruktionerne. For de fleste automatiske solafskærmninger vil der være mulighed for en manuel overstyring af automatikken, således at solafskærmningen kan kobles ud af funktion i et vist tidsrum.

For at opnå den største afskærmning over for solindfald er det bedst at anvende en udvendig solafskærmning, da solen afskærmes fra lokalet allerede inden energien kommer ind i lokalet. Med de forbedrede ruder med tilhørende lav U-værdi har indvendige solafskærmninger fået stadig dårligere afskærmningsfaktor, og i mange tilfælde vil denne ligge på ca. 0,9, svarende til at 90 % af solindfaldet forbliver inde i lokalet.

Der forekommer desværre projekter, hvor der i sidste øjeblik ønskes foretaget besparelser og en udvendig solafskærmning bliver erstattet med en indvendig. Denne handling kan have meget uheldige virkninger for det fremtidige termiske indeklima, hvis der ikke bliver foretaget en ny analyse af konsekvenserne af at fjerne den udvendige solafskærmning. Hvis disse analyser foretages, vil det hurtigt blive klart, at det vil være nødvendigt med større anlæg og dermed forøgede omkostninger. Omkostninger der let kan vise sig at være større end besparelsen ved at gå fra udvendig til indvendig solafskærmning.

En udvendig solafskærmning er kun effektiv, når den benyttes. Hvis brugeren overstyrer den udvendige solafskærmning og fjerner den helt i større dele af dagen, vil det få uheldige konsekvenser for det termiske indeklima. Det er derfor vigtigt at gøre en klar afvejning af hvilken solafskærmning, der skal benyttes, og i hvor høj grad den vil blive benyttet i praksis. Det er derfor vigtigt at være bevidst om, at der ved valg af afskærmning er forskellige ønsker, der kan være modsætningsfyldte. Den valgte løsning vil derfor være et kompromis, hvor brugerens ønsker må vurderes for at få den optimale løsning.

En solafskærmning er en vægtning mellem temperaturforhold/energiforbrug og dagslys/udsyn. Hvis en solafskærmning i den varme sommerperiode ikke anvendes, giver det meget dagslys og et frit udsyn. Dette kan imidlertid evt. give blændingsproblemer fra den direkte solstråling. Hvis tilsvarende solafskærmningen på varme skyfri sommerdage benyttes, vil det give et bedre termisk indeklima i form af lavere temperaturer og energiforbrug til køling, og ventilation vil blive lavere.

I projekteringsforløbet er det vigtigt at tage et valg af afskærmning så tidligt som muligt. Da dette valg får afgørende indflydelse på beregning af det termiske indeklima, er det vigtigt at holde fast i den valgte løsning. Hvis f.eks. byggeriets omkostninger stiger, og der på et senere tidspunkt ønskes besparelser ved at ændre en udvendig afskærmning til en indvendig, vil dette betyde en markant forringelse. Resultatet vil blive et langt højere tilskud af solstråling og dermed et forøget kølebehov. Det vil derfor være nødvendigt at foretage en ny beregning af det termiske indeklima.

Ifølge (SBI-anvisning 264, 2016b) kan solafskærmning opdeles i følgende typer:

- Vandret udhæng over vindue
- Sidefremspring ved lodret vindue
- Lyshylder
- Markiser
- Lamelafskærmninger
- Screens
- Skodder og bevægelige rammesystemer

- Gardiner, foldegardiner, plissé gardiner
- Solafskærmende ruder og sol film (omtalt tidligere)
- Afskærmninger med mikro strukturer
- Dagslys systemer

Herudover kan solindfaldet reduceres på grund af andre bygninger og beplantning.

Solafskærmende glas er omtalt i afsnittet belægninger, solafskærmende belægninger og omtales ikke her.

Det fremgår af listen ovenfor, at der er mange former for solafskærmning, og alle disse vil ikke blive omtalt i dette kapitel, idet der henvises til håndbøger og kataloger. Herudover er der i (SBI-anvisning 264, 2016b) en grundig gennemgang af emnet. Det er planen, at der skal inkluderes flere vigtige punkter fra (SBI-anvisning 264, 2016b); men dette har ikke været muligt i denne udgave af tidsmæssige årsager.

Der findes mange former for afskærmninger, og det vil føre for vidt at omtale dem alle, hvorfor der henvises til håndbøger og kataloger. Der kan også henvises til SBI-anvisning 264 Solafskærmninger (SBI-anvisning 264, 2016b).

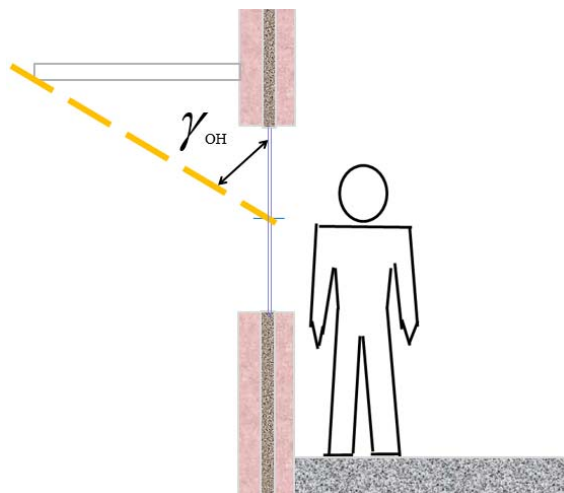
Der har i de senere år været en rivende udvikling inden for solafskærmninger. Der er kommet mange nye typer på markedet med mange forskellige kvaliteter. Det er f. eks. muligt at få udvendige solafskærmninger, hvor det er muligt at se igennem selvom udsynet er reduceret noget; men det er stadig en stor forbedring i forhold til solafskærmninger, hvor udsynet er helt blokeret. Der findes også faste solafskærmninger, der slet ikke kan bevæges og er for uanset om det er en mørk skyet vinterdag eller en solrig skyfri sommerdag.

### *Faste elementer*

I tilknytning til en bygning vil der forekomme forskellige skyggegivende elementer. Dette kan være nabobygninger, overhæng eller sidefinner, fastmonterede ikke-variable solafskærmninger, træer og buske. Ved beregningen af solstrålingen er det nødvendigt at medtage disse skygger. I forbindelse med forenkede beregningsmetoder, f.eks. ved beregning af døgnmiddel indetemperaturen, kan der benyttes en forenklet metode, hvor der anvendes en skyggefaktor.

### *Permanent afskærmning – Vandret udhæng over vindue*

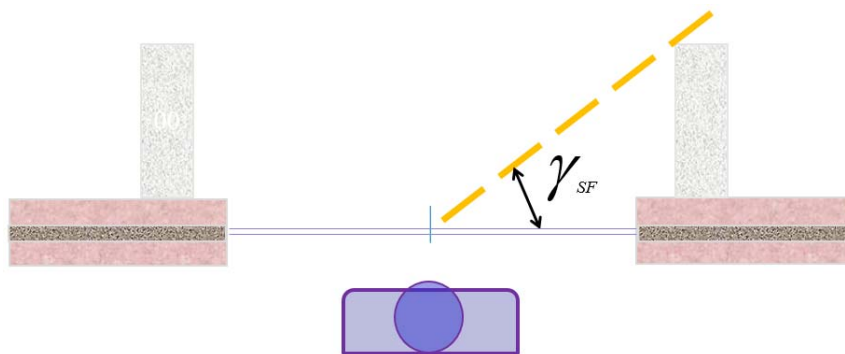
For at skærme for den direkte stråling kan et vandret udhæng benyttes. Hvor effektivt det virker er meget afhængigt af orienteringen og årstiden. For sydvendte facader vil der være en god afskærmning i sommermånederne, hvor solindfaldet ønskes reduceret og næsten ingen afskærmning i vintermånederne med den lave vintersol. For øst- og vestvendte facader har et udhæng generelt næsten ingen effekt. For at kunne vurdere udhængets størrelse i forhold til vinduet benyttes vinklen  $\gamma_{OH}$ , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af udhænget, Figur 12-5 – Se også Tabel 12-11.



Figur 12-5 Størrelsen af det vandrette udhæng over vindue vurderes ud fra vinklen  $\gamma_{OH}$ , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af udhænget

#### Permanent afskærmning – Sidefrespring ved lodret vindue

Som beskrevet ovenfor har et vandret udhæng over et vindue næsten ingen effekt for øst- og vestvendte facader. Her kan en mulighed være et sidefrespring ved vinduet for at reducere solindfaldet midt på dagen fra syd. I tilfælde af, at der ikke er noget vandret udhæng over vinduet, vil der være behov for at afskærme for sol om sommeren ved at forlænge sidespringet et stykke over vindueskanten. For at kunne vurdere sidefrespringets størrelse i forhold til vinduet benyttes vinklen  $\gamma_{SF}$ , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af frespringet, Figur 12-6 – Se også Tabel 12-11.



Figur 12-6 Størrelsen af det sidefrespring ved lodret vindue vurderes ud fra vinklen  $\gamma_{SF}$ , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af frespringet

### *Skyggefaktor ( $F_s$ )*

Vist i Tabel 12-10 er skyggefaktoren ( $F_s$ ) for vinduer, afhængigt af højdevinklen til det omkringliggende terræn. Er vinduet indbygget, eller er der et overhæng eller en sidefinne i tilknytning til vinduet, er det nødvendigt med en supplerende korrektionsfaktor (vist i Tabel 12-11) til skyggefaktorerne i Tabel 12-10.

For ikke at få for mange faktorer er det hensigtsmæssigt at benytte den resulterende værdi for skygger for vinduer med indbygning, udhæng, sidefinner, etc. fra Tabel 12 10 og Tabel 12 11. Den resulterede værdi opnås ved at lægge tallene sammen i Tabel 12 10 og Tabel 12 11, og denne værdi kan benyttes i *Ligning 12-13* til *Ligning 12-15*.

*Tabel 12-10 Skyggefaktorer,  $F_s$ , for vinduer og yderdøre, indbygget normalt i ydervæg og uden udhæng eller andre skyggende konstruktioner (SBI-anvisning 184, 1995)*

Omgivelser	NV – NØ	Ø, S, V
Fri horisont	0,9	0,9
10° Højdevinkel	0,9	0,8
30° Højdevinkel	0,8	0,5

*Tabel 12-11 Korrektion til skyggefaktorer pga. indbygning, udhæng og konstruktioner på siden af vinduer og yderdøre (SBI-anvisning 184, 1995)*

	Korrektion til skyggefaktor
<b>1) Indbygning</b>	
Uafskærmet	+0,1
Dybt murhul	-0,1
<b>2) Udhæng</b>	
Lille udhæng	-0,1
Stort udhæng	-0,2
<b>3) Konstruktion på siderne</b>	
Lille skygge	-0,1
Stor skygge	-0,2

1) Ved normal indbygning, uafskærmet, forstås at ydervæggen springer ca. 10° frem foran rudens plan målt fra midten af ruden. For dybt murhul er denne værdi 20°.

2) Ved et lille udhæng over vindue eller yderdør forstås at udhænget springer ca. 30° frem foran vinduets plan målt midt på vinduet. Et stort udhæng springer 50° frem.

3) Ved lille skygge fra en konstruktion på siderne forstås at konstruktionen springer 30° frem foran vinduets plan målt midt på vinduet. For stor skygge springer konstruktionen 50° frem.

### Selvstændige elementer

Alt efter deres placering i forhold til vinduet opdeles de selvstændige solafskærmninger på følgende måde:

- Indvendig solafskærmning
- Mellem glassene i ruden, integreret solafskærmning
- Udvendig solafskærmning

En udvendig solafskærmning er den mest effektive, da solstrålingen afskærmes inden den når ind til selve ruden. En indvendig solafskærmning giver kun begrænset afskærmning for de nye typer ruder med en lav U-værdi. Tidligere har indvendig afskærmning i form af f.eks. et indvendigt gardin foran en traditionel almindelig standard dobbelt rude (U-værdi ca. 2,9 W/m<sup>2</sup>K) haft en afskærmningsfaktor på ca. 0,5. Ved anvendelse af de nye energiruder reduceres effekten fra det indvendige gardin meget markant og får kun en størrelse på ca. 0,9. Efter solstrålingen har passeret en energirude og rammer den indvendige afskærmning vil hovedparten af solenergien afgives til lokalet som varme, og dermed være med til at forøge den operative temperatur/kølebehovet.

### Udsynsklasse og Vægtningsfaktor af en afskærmningstime

For at kunne vægte solafskærmninger med varierende udsynskvaliteter er disse blevet klassificerede i forskellige udsynsklasser. Dette er beskrevet i (SBI-anvisning 264, 2016b) og denne er baseret på DS/EN 14 501 (Dansk standard, 2005).

I Tabel 12-12 er vist sammenhængen mellem udsynsklasser i henhold til SBI-anvisning 264. Tabellen anvendes på følgende måde:

- Solafskærmning trukket 1/3 for i en time – timen vægtes kun 1/3
- Vægtningsfaktoren ganges på antallet af timer med solafskærmning

*Tabel 12-12 Kombination af Udsynsklasse og Vægtningsfaktor af en afskærmningstime, som anført i (SBI-anvisning 264, 2016b) og (Dansk standard, 2005)*

	Udsynsklasse for solafskærmning	Vægtningsfaktor af en afskærmningstime
Afskærmning med blokeret udsyn	0	1,00
	1	0,95
	2	0,80
	3	0,60
Afskærmning med bedst udsyn	4	0,15

I mange tilfælde vil udsynsklassen ikke være kendt for en aktuel solafskærmning, og derfor er der Tabel 12-13 givet en vejledning til at vurdere udsynsklassen.

*Tabel 12-13 Karakteregenskaber for afskærmningstyper, (som anført i SBI-anvisning 264 tabel 19, med enkelte justeringer efter samråd med forfatteren). (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

Placering	Afskærmningstype	Variant	Udsyns-klasse	Vægtning
Udvendig	Persienne, vandrette lameller, grå	Lukket	0	1,00
	Persienne, vandrette lameller, grå	45°	3	0,60
	Persienne, vandrette lameller, grå	0°	4	0,15
	Lamelskodde, flytbar	Faste	1	0,95
	Lamelskodde, flytbar	Drejelige	2	0,80
	Screen, hvid	Åbningsfaktor = 10 %	1	0,95
	Screen, lys	Åbningsfaktor = 5 %	0	1,00
	Screen, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Screen, grå	Åbningsfaktor = 10 %	3	0,60
	Screen, grå-sort	Åbningsfaktor = 10 %	3	0,60
	Screen, grå-sort	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Markise, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	3	0,60
	Markise, lys	Åbningsfaktor = 3 %	3	0,60
	Markisolette, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	2	0,80
	Markisolette, lys	Åbningsfaktor = 3 %	2	0,80
Integreret	Integreret persienne, hvid	Lukket	0	1,00
	Integreret persienne, hvid	45°	2	0,80
	Integreret persienne, hvid	0°	3	0,60
Indvendig	Persienne, vandrette lameller, hvid	Lukket	0	1,00
	Persienne, vandrette lameller, hvid	45°	3	0,60
	Persienne, vandrette lameller, hvid	0°	4	0,15
	Screen, hvid	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Screen, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	1	0,95
	Gardiner, lyse	(Åbningsfaktor = 0 %)	1	0,95
	Gardiner, mellem	(Åbningsfaktor = 0 %)	1	0,95
	Gardiner, mørke	(Åbningsfaktor = 0 %)	0	1,00
Glas	Solafskærmende glas	LT < 0,7 og LT/g > 1,8	4	0,15
	Kraftigt solafskærmende glas	LT < 0,4 og LT/g > 1,8	3	0,60



I Tabel 12-19 er vist kravspecifikationer til indeklimaklasserne for erhverv og andet ved dimensionerende forhold, og heraf fremgår hvor mange procent af brugstiden afskærmningen er aktiv. I tabellen fremgår det at for Standard indeklimaklasse anvendes en værdi på 30%. Der benyttes en brugstid mellem kl. 7 og kl. 18. Hvis afskærmningen har delvist udsyn benyttes de angivne vægtningsfaktorer fra Tabel 12-13.

### *Afskærmningsfaktor $F_c$*

I forbindelse med analyse af de termiske forhold i en bygning opstår der i mange tilfælde overtemperaturer, og for at reducere disse anvendes forskellige former for solafskærmning. Ved valg af solafskærmning er det vigtigt at kombinere hensynet til effektiv afskærmning for at reducere overtemperatur med hensynet til maksimal udnyttelse af passiv solvarme i opvarmningssæsonen, hvis denne ønskes udnyttet. I kontorbyggeri er der normalt en stor varmebelastning og dermed overskudsvarme, hvilket medfører at direkte solindfald ønskes begrænset i mange tilfælde.

Af Tabel 12-14 fremgår det, at de udvendige afskærmninger er de mest effektive, hvilket hænger sammen med, at de standser solenergien allerede før den rammer vinduet. Dette sker dels ved at strålingen bliver reflekteret fra afskærmningen, og dels ved at dens absorberede stråling afgives ved konvektion til det fri. Hvis energien først får lov til at passere ind i rummet, bliver den absorberet i bygningskonstruktionerne og afgives derefter som varme til rummet. Det er derfor en fordel ved anvendelse af indvendige afskærmninger, at de har en høj reflektans, således at de kan reflektere solindfaldet ud igen.

De fleste af de målinger, der ligger til grund for tabeller som Tabel 12-14 har været udført for to-lags ruder, hvorfor resultaterne ikke umiddelbart kan anvendes ved andre rudetyper.

For at kunne vurdere de forskellige solafskærmende foranstaltninger, er der behov for at have et tal til vurdering af afskærmningens effektivitet. Til dette anvendes afskærmningsfaktor  $F_c$ , der udtrykker andelen af solstrålingen, som går igennem rude/system (rude + afskærmning), sammenlignet med en referencerude. Denne størrelse kan enten udtrykkes ved brug af forholdet mellem g-værdier eller forholdet mellem den totale transmitterede solstråling:

$$F_c = \frac{g_{sys}}{g_{rude}} \Leftrightarrow g_{sys} = F_c \cdot g_{rude} \quad \text{Ligning 12-9}$$

Afskærmningsfaktoren udtrykker således forholdet mellem g-værdien for systemet (rude + afskærmning) og g-værdien for ruden. Af formelen ses det, at jo mindre afskærmningsfaktor des bedre afskærmning, og benævnelsen er derfor noget vildledende. Hvis der f.eks. er en rude med en afskærmning med en afskærmningsfaktor på 0,3, beskriver denne værdi at solafskærmningen lader 30 % af den totale transmitterede solstråling passere set i relation det solindfald, som den uafskærmede rude lader passere (100%). Anvendelsen af denne afskærmningsfaktor reducerer således den totale transmitterede solstråling med 70%.

I det ovenstående er kun beskrevet afskærmningsfaktor for solvarme. Dette er et væsentligt forhold ved beregning af termisk indeklima og ventilations- og kølebehov, hvilket er det relevante område for dette kapitel. Der forefindes på tilsvarende vis en afskærmningsfaktor for dagslys; men denne vil ikke blive behandlet i dette kapitel.

Det er vigtigt at være opmærksom på at g-værdien står for total transmittans af solenergi for ruden. Denne værdi rummer således summen af den direkte transmitterede solstråling og den absorberede stråling i ruden, der tilføres til rummet på den indvendige side af ruden, se Figur 12-3.

En afskærmningsfaktor skal altid angives i forhold til en referencerude. Oprindeligt blev der normalt i Danmark anvendt en reference rude bestående af en almindelig standard dobbeltrude (2 lag 4 mm glas med 12 mm luftmelletrum) med en g-værdi på 0,76. I Tabel 12-14 er vist afskærmningsfaktorer med reference til en almindelig standard dobbeltrude.

*Tabel 12-14 Afskærmningsfaktorer for forskellige solafskærmninger med reference til en traditionel standard dobbeltrude. (SBI-anvisning 196, 2000)*

Afskærmning	Afskærmningsfaktor	
	for solvarme	for dagslys
Ingen solafskærmning	1,0	1,0
<b>Solafskærmning udvendig foran to lag glas</b>		
Persienner, lyse lameller, 45°	0,22	0,18
Persienner, mørke lameller, 45°	0,12	0,01
Netrullegardiner	0,20	0,15
Markise	0,25-0,50	Afhænger af farve og udformning
<b>Solafskærmning mellem to lag glas</b>		
Gardiner, lyse og delvis gennemskeinnelige	0,30	0,40
Gardiner, mørke og uigennemskeinnelige	0,45	—
Persienner, lyse, 45°	0,35	0,25
<b>Solafskærmning indvendig bag to lag glas</b>		
Gardiner, lyse og delvis gennemskeinnelige	0,50	0,40
Gardiner, mørke og uigennemskeinnelige	0,80	—
Persienner, lyse lameller, 45°	0,55	0,25
Persienner, mørke lameller	0,80	0,03
<b>Behandlede ruder</b>		
Absorberende glas yderst, almindeligt glas inderst	0,65-0,75	0,50-0,70
Reflekterende glas yderst, almindeligt glas inderst	0,18-0,40	0,10-0,35

Anvendelsen af referencerude er ikke den samme i alle lande. I f.eks. England og USA benyttes en referencerude med ét lag glas med en soltransmittans på 0,87 og i Norge 0,86 (et 3 mm tykt lag

glas). Hvis der foretages sammenligninger af forskellige solafskærmninger landene imellem, er det vigtigt at være opmærksom på dette, idet der skal anvendes samme referencerude.

På tilsvarende vis er der i Tabel 12-15 vist forskellige indvendige solafskærmninger med reference til tre lags rude med energiglas. Tabellen er medtaget for at illustrere den store forskel, som opstår for indvendige solafskærmninger. Hvis en indvendig persienner med lyse lameller (lamel vinkel 45°) sammenlignes, fås en afskærmningsfaktor med en traditionel standard dobbeltrude på 0,55 og for tre-lags rude med energiglas en værdi på 0,87. Det ses således, at for indvendige afskærmninger har det kolosal stor betydning at have den korrekte reference rude ellers fås fuldstændig misvisende værdier. Anvendelsen af den indvendig persienner med lyse lameller giver således en reduktion af den totale transmitterede solstråling for en traditionel standard dobbeltrude på 45% og for en tre-lags rude energirude på 13%, svarende til en forholdsmæssig forskel på 3,5. Da der ved alle nye bygninger og renovering af bestående altid vil blive anvendt ruder med lav U-værdi vil indvendige afskærmninger ikke have særlig stor effekt. Indvendige afskærmninger anvendes derfor i dag primært for at undgår blænding fra solen og ikke for at reducere energi fra solvarme.

*Tabel 12-15 Afskærmningsfaktorer for forskellige indvendige solafskærmninger med reference til tre lag energiglas*

Afskærmning	Afskærmningsfaktor	
	for solvarme	for dagslys
<b>Solafskærmning indvendig bag tre lag glas</b>		
Rullegardin, lyse og delvis gennemsiknelige	0,89	0,57
Gardiner, mørke og uigennemsiknelige	0,80	0,06
Persienner, lyse lameller, 45°	0,87	0,34

Eksemplet viser således med al tydelighed, at det er af afgørende betydning ved vurdering af solafskærmninger, at den vurderes foran den aktuelle rude og afskærmningsfaktoren ændre sig alt efter, hvilken rude som anvendes. I Danmark anvendes der i dag energiruder med mindst én lavemissionsbelægning, hvilket resulterer i at det er nødvendigt specifikt at beregne afskærmningsfaktoren for den aktuelle rude. Dette vil i princippet give et meget stort antal variationer. For at forenkle det har den europæiske standard DS/EN 14501 (Dansk standard, 2005) defineret fire referenceruder, som fabrikanter af solafskærmninger kan beregne deres værdier i forhold til. I Tabel 12-16 er vist uddrag af tabellen for de fire referenceruder A, B, C og D. Den fulde tabel er også gengivet i (SBI-anvisning 264, 2016).

Tabel 12-16 Anvendte referenceruder i DS/EN 14501 (Dansk standard, 2005). Glas angives udefra og indefter. I standarden er rude D betegnet "solar reflective (sr)". Baseret på (SBI-anvisning 264, 2016b)

Rudenavn	Rudetype	Antal Glas	Belægning	Termiske data	Energi data			
					G-værdi	Transmittans	Reflektans udv	Reflektans ind
DS/EN 14501:2005 Annex A-D	Glastykkelse og afstand	u	lavemissions-belægning overflade talt udefra	U-værdi				
	mm			$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)	g (%)	$\tau_e$ (%)	$\rho_e$ (%)	$\rho'_e$ (%)
A	4 klar	1	-	5.8	0.85	0.83	0.08	0.08
B	4klar /12luft/4 klar	2	-	2.9	0.76	0.69	0.14	0.14
C	4 klar/16Ar/4lowE	2	3	1.2	0.59	0.49	0.29	0.27
D	4sr,lowE/16Ar/4 klar	2	2	1.1	0.32	0.27	0.29	0.38

### Beregning af g-værdi for systemets solenergitransmittans, $g_{sys}$

Beregning af systemets solenergitransmittans,  $g_{sys}$  er kompliceret at beregne, hvis det skal gøres helt korrekt. I stedet er der i (SBI-anvisning 264, 2016b) beskrevet en forenklet metode baseret på (Dansk Standard, 2007b). Denne standard er nu trukket tilbage og erstattet med (Dansk Standard, 2017). Metoden er baseret på stråling vinkelret på solafskærmningen, som antages parallel med ruden. Denne forenkling giver anledning til en mindre fejl på mellem -0,02 og +0,10. Da værdien i de fleste tilfælde resulterer i en større værdi (op til 0,10) er det på den sikre side med hensyn til at beregne ventilationsluftmængder / kølelast i sommerperioden. Da metoden er baseret på stråling vinkelret på solafskærmningen, tager metoden ikke hensyn til, hvis indfaldsvinklen har betydning for størrelsen på afskærmningsfaktoren.

Systemets solenergitransmittans  $g_{sys}$  beregnes ifølge (SBI-anvisning 264, 2016b) for tre typer afskærmninger:

- g-værdi for udvendige afskærmninger
- g-værdi for indvendige afskærmninger
- g-værdi for integrerede afskærmninger (mellem glassene)

I formlerne benyttes varmeoverføringskoefficient (varmeovergangstal), og da dette i standarden er benævnt  $G$  anvendes dette symbol i de følgende formler. Dette er ikke i overensstemmelse med den danske notation hvor  $h$  benyttes.

### Symboler for beregning af g-værdier i Ligning 12-10 til Ligning 12-12

For at gøre det mere overskueligt er symboler for Ligning 12-10 til Ligning 12-12 medtaget i selve teksten, symboler hentet fra (SBI-anvisning 264, 2016b):

$\tau_{e,B}$	Transmittans af direkte sol for afskærmningen [–]
$\rho_{e,B}$	Reflektans for direkte sol for afskærmningen [–]
$\alpha_{e,B}$	Absorbtans for direkte sol for afskærmningen [–]
$g$	g-værdi for rude. Total transmittans af solenergi for ruden. Denne værdi er summen af den direkte transmitterede solstråling og den absorberede stråling i ruden, der tilføres til rummet på den indvendige side af ruden [–]
$g_{\text{sys}}$	g-værdi for systemets solenergitransmittans [–]
$U_g$	Termisk transmissionskoefficient (U-værdi) af ruden [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
$e$	Indeks for energi [–]
$B$	Indeks for afskærmning (b for blind) [–]
$G$	Varmeoverføringskoefficient (anvendt i Dansk Standard, 2007b) [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

### g-værdi for udvendige afskærmninger

Systemets solenergitransmittans  $g_{\text{sys}}$  for udvendige afskærmninger beregnes ifølge Ligning 12-10 – Bemærk, denne formel er rettet i forhold til (SBI-anvisning 264, 2016b), hvor der er en mindre fejl:

$$g_{\text{sys}} = \tau_{e,B} \cdot g + \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{\text{udv}}}{G_2} + \tau_{e,B} \cdot (1 - g) \cdot \frac{G_{\text{udv}}}{G_1}$$

hvor:  $\alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B}$        $G_1 = 5 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$        $G_2 = 10 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$  Ligning 12-10

$$G_{\text{udv}} = \left( \frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1}$$

### g-værdi for indvendige afskærmninger

Systemets solenergitransmittans  $g_{\text{sys}}$  for indvendige afskærmninger beregnes ifølge Ligning 12-11 – Bemærk, denne formel er rettet i forhold til (SBI-anvisning 264, 2016b), hvor der er en mindre fejl:

$$g_{\text{sys}} = g \cdot (1 - g \cdot \rho_{e,B} - \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{\text{indv}}}{G_2})$$

hvor:  $\alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B}$        $G_2 = 30 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$  Ligning 12-11

$$G_{\text{indv}} = \left( \frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1}$$

*g-værdi for integrerede afskærmninger (mellem glassene)*

Systemets solenergitransmittans  $g_{\text{sys}}$  for integrerede afskærmninger beregnes ifølge Ligning 12-12:

$$g_{\text{sys}} = g \cdot \tau_{e,B} + g \cdot (\alpha_{e,B} + (1-g) \cdot \rho_{e,B}) \cdot \frac{G_{\text{int}}}{G_3}$$

$$\text{hvor: } \alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B} \quad G_3 = 3 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

*Ligning 12-12*

$$G_{\text{int}} = \left( \frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_3} \right)^{-1}$$

### *Termisk komfort*

Solafskærmning ved store vinduesarealer har anselig betydning for den termiske komfort. Ifølge (SBI-anvisning 264, 2016b) kan det forventes, hvis glasset udgør mere end 30-35 % af facaden (målt indvendigt), at der kan være behov for en udvendig solafskærmning foran vinduerne.

Med fremkomsten af nye rudetyper med f.eks. en  $g$ -værdi på 37 % med en tilhørende høj lys transmittans på 68 % er det blevet muligt f.eks. at reducere solindfaldet markant uden at lys transmittansen reduceres særligt meget.

Anvendes ruder med en  $g$ -værdi på 28 % med en lys transmittans på 52 % eller lavere værdier for disse to værdier, åbner det op for alternative muligheder, hvor den udvendige solafskærmning eventuelt kan erstattes af solafskærmende ruder kombineret med indvendige gardiner mod blænding. Ved moderne byggeri bør denne løsning vurderes fremfor kun at undersøge anvendelse af udvendig solafskærmning. Det bør imidlertid præciseres, at anvendelse af denne løsning kun bør ske efter en analyse med et dynamisk simuleringsprogram.

Solafskærmninger skal altid anvendes med varsomhed, da de begrænser udsynet i forhold til anvendelsen af solafskærmende ruder, hvor udsynet ikke reduceres. Herudover fungerer en udvendig solafskærmning kun, hvis den er i brug. Hvis brugeren føler sig generet af den udvendige solafskærmning, fordi den bevæger sig for meget op og ned eller er for alt for mange timer, kan det resultere i at brugerne forlanger anvendelsen af den udvendige solafskærmning reduceret.

Opmærksomheden henledes til, at hvis afskærmningerne ikke bliver udnyttet fuldt ud, vil de realistiske afskærmningsfaktorer blive højere (f.eks. afskærmningen kun for i tre af fire vinduer i et kontor, eller den ikke er rullet helt ned). Desuden er de ikke i permanent brug, hvorfor solindfaldet kun skal multipliceres med afskærmningsfaktoren i de timer, hvor den anvendes.

En afskærmning for solen har den fordel, at den reducerer sol indstrålingen, og dette bevirker at kølebelastningen bliver mindre eller stigningen i den operative temperatur reduceres.

I området nær vinduet vil den lokale strålingstemperatur være meget påvirket af solafskærmningen. Indvendig solafskærmning vil i de fleste tilfælde øge afskærmningens indvendige

overfladetemperatur, hvilket vil resultere i en højere værdi for den lokale operative temperatur. I modsætning til dette vil en udvendig solafskærmning sænke rudens indvendige overfladetemperatur og dermed reducere den lokale operative temperatur.

### *Screens*

Screens består af udspændte solafskærmningsgardiner og benyttes i stor udstrækning til moderne byggeri. De udformes ofte som rullegardiner, der kan placeres udvendigt, indvendigt eller integreret i ruden og kan trækkes ned i den ønskede position. Der findes et meget stort antal forskellige screenduge med en anelig variation af egenskaber. I mange tilfælde giver en screendug mulighed for udsyn igennem den, og dermed har brugeren stadig en form for kontakt med omgivelserne selvom den er i brug. Ved beslutning af hvilken screendug, som ønskes benyttet, er det nødvendigt at vurdere screendugens solafskærmende og blændingsbeskyttende egenskaber i relation til i hvilken grad screendugen giver udsyn. En mere detaljeret beskrivelse af dette kan findes i (SBI-anvisning 264, 2016b). Opmærksomheden henledes på at brugere af et lokale med hensyn til udsyn hellere vil foretrække, at der ikke er nogen afskærmning overhovedet. Det er derfor vigtigt at en screendug ikke er trukket for mere end maksimalt fem timer pr. dag, selvom det rent energimæssigt kan være en fordel, at den er trukket for i flere timer. Det er altid vigtigt at sætte sig i brugerens sted og sørge for en rimelig balance imellem afskærmning og det frie udsyn.

### **Beregning af transmitterede solstråling gennem rude**

I tabellerne i Afsnit Appendiks 12.19 er vist værdierne for en skyfri dag for den direkte transmitterede solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76. Tabellerne er baseret på (DANVAK, 2006) og beregnet for den 21. i hver måned for de 8 orienteringer: syd, sydvest, vest, nordvest, nord, nordøst, øst og sydøst, se Tabel 12-22 til Tabel 12-29. Herudover er der i Tabel 12-30 vist den transmitterede diffuse himmelstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude. Alle tabeller er vist i enheden W/m<sup>2</sup>.

På denne baggrund kan følgende grundlæggende værdier findes for en skyfri dag for den transmitterede stråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude. Da der indgår mange symboler er disse medtaget i det følgende for at give en bedre oversigt.

#### *Symboler for beregning af transmitterede solstråling gennem rude*

- $A_{rude}$  [m<sup>2</sup>], Areal af rude
- $A_{vin}$  [m<sup>2</sup>], Areal af vindue
- $F_c$  [–], Afskærmningsfaktor, findes ved brug af Ligning 12-9
- $F_{rude}$  [–], Korrektionsfaktor for rudeareal i forhold til vinduesareal:  $F_{rude} = A_{rude}/A_{vin}$
- $F_s$  [–], Skyggefaktor, Korrektur for skygger på vindue (ingen skygge:  $F_s = 1,0$ ). Faktoren er den resulterende værdi for skygger for vinduer med indbygning, udhæng, sidefinner, etc. – se f.eks. Tabel 12 10 og Tabel 12 11 resulterende værdi (tallene ganget sammen)
- $g_{ref}$  [–], g-værdi for reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76
- $g_{rude}$  [–], g-værdi for aktuel rude der anvendes

- $I_{t,dir}$  [W/m<sup>2</sup>], Transmitteret direkte solstråling gennem uafskærmet standard dobbeltrude: Tabel 12-22 til Tabel 12-29
- $I_{t,dif}$  [W/m<sup>2</sup>], Transmitteret diffus himmelstråling gennem uafskærmet standard dobbeltrude: Tabel 12-30
- $I_{t,reflek}$  [W/m<sup>2</sup>], Transmitteret reflekteret stråling fra omgivelser fra sol gennem uafskærmet standard dobbeltrude
- $Q_{sol}$  [Wh], Energitilskud fra solindfald, hvis tiden regnes i timer
- $\rho$  [–], Reflektans fra omgivelser
- $\rho_{ref}$  [–], Referenceværdi for reflektans fra omgivelser, sættes ofte til  $\rho_{ref}=0,2$
- $\Delta \tau_h$  [h], Længde af tidsperiode i timer
- $\Phi_{sol}$  [W], Solindfald gennem vinduets rudeareal

### *Transmitteret solstråling gennem rude på basis af data fra transmitteret stråling gennem standard reference rude*

På denne baggrund kan det aktuelle solindfald beregnes på timebasis for et aktuelt vindue, idet der korrigeres for parametre beskrevet ovenfor. Ligning 12-13 er baseret på, at det transmitterede solindfald ( $I_{t,dir}$  og  $I_{t,dif}$ ) gennem en referencerude kendes, og denne referencerude har en g-værdi på  $g_{ref}$ .

Den reflekterede stråling fra omgivelserne er direkte proportional med reflektantens størrelse. Reflektantens størrelse for omgivelserne sættes ofte til en referenceværdi på  $\rho_{ref}=0,25$  (eller 0,2).

Effektilskud fra transmitteret solstråling gennem rude, effekt:

$$\Phi_{sol} = A_{vin} \cdot F_{rude} \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot [(I_{t,dir} \cdot F_s) + I_{t,dif} + I_{t,reflek} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \quad (W) \quad \text{Ligning 12-13}$$

$$\Phi_{sol} = A_{rude} \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot [(I_{t,dir} \cdot F_s) + I_{t,dif} + I_{t,reflek} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \quad (W)$$

I Danmark anvendes en reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76, hvorved fås:

$$\Phi_{sol} = 1,316 \cdot A_{vin} \cdot F_{rude} \cdot F_c \cdot g_{rude} \cdot [(I_{t,dir} \cdot F_s) + I_{t,dif} + I_{t,reflek} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \quad (W) \quad \text{Ligning 12-14}$$

$$\Phi_{sol} = 1,316 \cdot A_{rude} \cdot F_c \cdot g_{rude} \cdot [(I_{t,dir} \cdot F_s) + I_{t,dif} + I_{t,reflek} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \quad (W)$$



For at beregne energitilskud fra transmitteret solstråling gennem rude er det nødvendigt at gange med tiden. Hvis tiden har enheden timer fås enheden Wh:

$$Q_{sol} = A_{vin} \cdot F_{rude} \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot [(I_{t,dir} \cdot F_s) + I_{t,dif} + I_{t,reflek} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \cdot \Delta\tau_h \quad (Wh)$$

$$Q_{sol} = A_{rude} \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot [(I_{t,dir} \cdot F_s) + I_{t,dif} + I_{t,reflek} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \cdot \Delta\tau_h \quad (Wh)$$

Ligning  
12-15

$$\Rightarrow Q_{sol} = A_{rude} \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot \sum_{i=1}^{i=24} \left( [(I_{t,dir,i} \cdot F_s) + I_{t,dif,i} + I_{t,reflek,i} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \cdot \Delta\tau_h \right)$$

$$\Rightarrow Q_{sol} = A_{rude} \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot \sum_{i=1}^{i=24} \left( [(I_{t,dir,i} \cdot F_s) + I_{t,dif,i} + I_{t,reflek,i} \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}}] \cdot 1 \right)$$

$Tidsstep \Delta\tau_h = 1time \quad (Wh)$

Hvis tiden er 1 time bliver den numeriske størrelse på effekten i W og energitilskuddet i Wh den samme.

## 12.11. Udetemperatur, Vejrdata, Reference år

Dette afsnit omhandler:

- Udetemperatur
  - Maksimal timemiddeludetemperatur
  - Døgnmiddeludetemperatur
- Vejrdata, Reference år
  - Dynamiske simuleringsprogrammer

Afsnittet er delt op i to dele, da afsnittene henvender sig til to forskellige hovedkategorier / løsningsmetoder:

- Stationære forhold – Maksimal timemiddelindetemperatur, Døgnmiddelindetemperatur
- Ikke-stationære forhold – Dynamiske simuleringsprogrammer

### Udetemperatur

Differensen mellem rumtemperaturen og udetemperaturen er bestemmende for rummets transmissions- og fugetab. Udetemperaturen kan f.eks. hentes fra det danske referenceår, der på timebasis angiver de vigtigste klimaparametre, se næste afsnit.

Ved beregninger af overslagsmæssig karakter af indetemperaturen kan udetemperaturen hentes fra relevante referenceår, hvor en relevant dag findes på baggrund af opstillede kriterier, f.eks. en varm skyfri dag med store temperaturudsving i løbet af et døgn.

Hvis der ikke findes klimadata for den pågældende lokalitet, eller der ikke er ønske om at anvende referenceåret, kan udetemperaturen angives ved en cosinusfunktion med maksimum f.eks. klokken 14.00:

$$\theta_u = \overline{\theta_u} + \Delta\theta_u \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi (\tau_h - 14)}{24} \quad \text{Ligning 12-16}$$

I mange tilfælde er det udetemperaturen på klare solskinsdage, der ønskes beregnet. For at kunne gøre dette, er der i Tabel 12-17 angivet maksimal døgnmiddel og typiske døgnvariationer af udetemperatur på klare dage i de enkelte måneder baseret på (SBI-anvisning 196, 2000).

*Tabel 12-17 Maksimal døgnmiddel og typiske døgnvariationer af udetemperatur på klare dage i de enkelte måneder ud fra 15 års vejrdata. Bemærk dette er ikke data fra ” DRY Danmark 2013”. (SBI-anvisning 196, 2000)*

<b>Måned</b>	<b>Udetemperatur, °C Maks. døgnmiddel</b>	<b>Udetemperatur, °C Typisk variation</b>
Januar	3,9	5,0
Februar	4,2	6,0
Marts	6,3	7,5
April	11,2	9,0
Maj	15,9	11,5
Juni	20,0	12,0
Juli	21,0	12,0
August	20,5	11,0
September	16,9	9,0
Oktober	13,7	7,0
November	10,0	5,0
December	6,0	5,0

## Vejrdata, Reference år, DRY Danmark 2013

### *Indledning*

Dette afsnit om vejrdata og referenceårer taget med, da der undertiden opstår misforståelser med hensyn til baggrunden for referenceår. Referenceår har data på timebasis og anvendes i forbindelse med beregning af bygningers varmebalance med anvendelse af dynamiske simuleringsprogrammer. Dette kapitel har ikke sit fokus på årssimuleringer, og derfor er vejrdata for Danmark kun omtalt ganske kort, idet afsnittet er baseret på (Wang et al., 2012) (Wang et al., 2013), og mere detaljeret information kan findes i denne publikation. Referenceår er timebaserede vejrdata, der beskriver klimaets naturlige sammensætning. De parametre, der indgår, afhænger af formatet (DRY, TRY, TMY, etc.) på de indgående vejrdata; men nogle af de vigtigste er følgende:

- Global solstråling
- Direkte solstråling
- Diffus solstråling
- Lufttemperatur
- Dugpunkts temperatur
- Vindhastighed
- Vindretning
- Barometertryk
- Skydække

Nogle af disse data er målte; mens andre er beregnede værdier ud fra de målte. For mange lokaliteter verden over er der blevet udarbejdet referenceår. Det er imidlertid Europa og USA, der er bedst dækket ind, hvorimod det er mere sparsomt i den øvrige del af verden.

En af de misforståelser, der ofte opstår i forbindelse med beregning af døgnmiddelindetemperaturen for varme skyfrie solrige dage, er at en bruger anvender data fra referenceåret, hvilket **IKKE** er korrekt. Hvis der for eksempel ønskes beregnet døgnmiddelindetemperaturen for den 15. august for en varm skyfri solrig dag, skal data således ikke hentes fra referenceåret, se i stedet afsnittet om udetemperatur og solindfald.

### *Det nye Design Reference Year – DRY Danmark 2013*

Det nye Design Reference Year for Danmark dækker perioden 2001-2010. Ved henvisning til referenceåret benyttes året 2013: "*DRY Danmark 2013*". Programmet BSim benytter følgende placering for disse vejrdata: breddegrad 55,793°N og længdegrad 12,16°Ø.

Der er i denne nye version en zone-inddeling af landet, hvorved data for et bestemt område kan vælges for at give den bedste repræsentation af den aktuelle beliggenhed.

I det nye datasæt er der inkluderet fire målte værdier og disse datasæt består primært af time-midler:

- Global stråling
- Temperatur
- Relativ fugtighed
- Vindhastighed

I tillæg er der to beregnede parametre baseret på den målte globale stråling:

- Diffus stråling
- Illuminans

Danmark er blevet opdelt i et antal zoner for hver parameter. Zonerne er udvalgt med henblik på at have nogenlunde samme klimatologiske variationer hen over året og døgnet. For den enkelte zone er der for hver parameter udvalgt en DMI station, således at den repræsenterer zonen bedst muligt.

Ved opbygning af datasættet er der anvendt time-midler for de indgående data. Opbygningen af referenceåret er baseret på 12 typiske måneder fra 2001 til 2010. De enkelte måneder er håndplukket til at repræsentere den karakteristiske klimatologi i Danmark hen over året. De måneder, som er anvendt i referenceåret er vist i Tabel 12-18.

*Tabel 12-18 DRY året består af DMI data fra de angivne år. (Wang et al., 2012).*

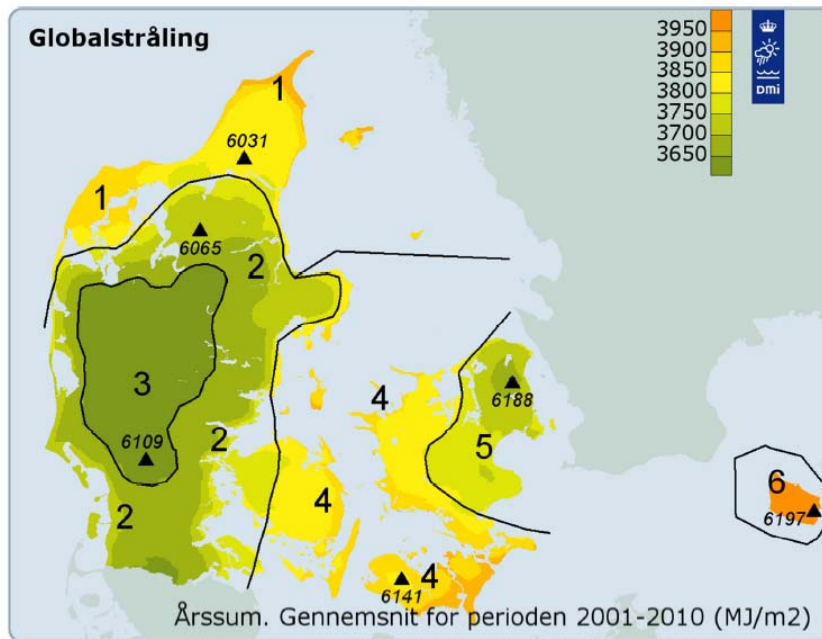
Måned	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.
År	2009	2009	2006	2010	2006	2005	2009	2009	2009	2008	2010	2009

## Zoner

Der er foretaget en zoneopdeling for de fire målte datasæt:

- Global stråling
- Temperatur
- Relativ fugtighed
- Vindhastighed

Et eksempel på en zoneopdeling for global stråling er vist på Figur 12-7. Alle de fire kort med zoneinddeling er vist i (Wang et al., 2012) med tilhørende detaljeret beskrivelse.



Figur 12-7 Zoneinddeling af Danmark til brug i DRY for global stråling.

Kilde: (Wang et al., 2012)

## 12.12. Varmebalance – Termisk indeklima

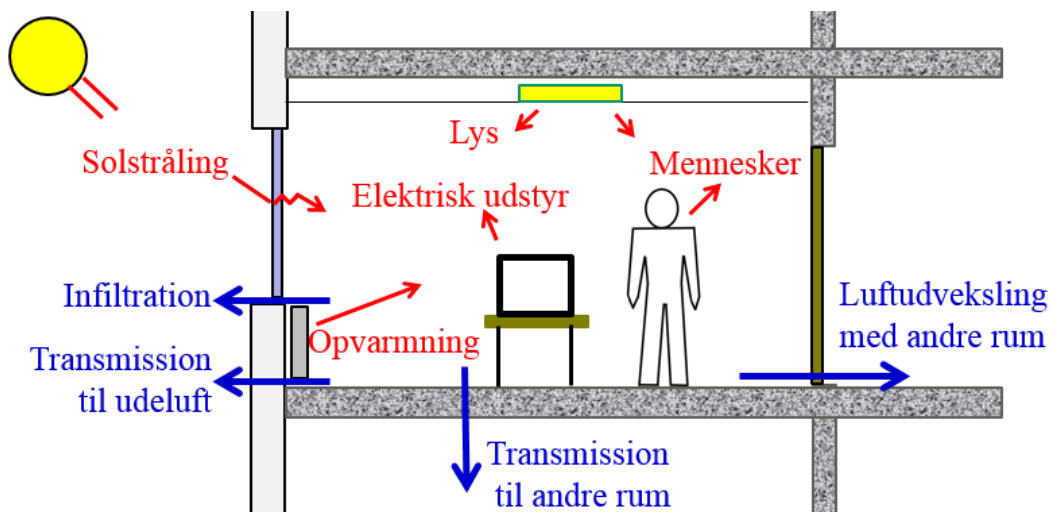
Det termiske indeklima og energiforbruget i et rum er resultatet af et kompliceret samspil mellem bygningens udformning, de termiske belastninger, klimaanlægget og udeklimaet. For at få et tilfredsstillende termisk indeklima skal de nødvendige luftmængder til de enkelte rum beregnes. Beregningen af den nødvendige luftmængde er for et givet rum afhængig af interne belastninger, eksterne belastninger fra solindfald (herunder anvendelse og brug af solafskærmning), skyggeforhold, anvendelse af køling af ventilationsluft inklusive acceptabel indblæsning af undertemperatur, antal timer med anvendelse af ventilation, antal timer med anvendelse af natteventilation, den akkumulerende masse af lokalet, etc. Alle disse faktorer giver et kompleks samspil, der stiller krav om en grundig forståelse af hele optimeringsprocessen. Det primære krav er, at det i løbet af døgnet er muligt at bortlede så meget varme som muligt – baseret på så korrekte baggrundsdata som muligt. Disse baggrundsdata må baseres på en ingeniørmæssig vurdering. F.eks. vil almenbelysningen være tændt på en skyfri dag i de timer, hvor solafskærmningen ikke er for? Der er ikke noget entydigt svar på dette. En eventuel automatisering kan være med til at styre brugen; men denne kan blive overstyret af personerne, som opholder sig i bygningen.

For at gøre rede for dette er det nødvendigt at opstille en varmebalance for rummet. De effekter, der indgår i varmebalancen, er illustreret på Figur 12-8. For et rums varmebalance skal der til ethvert tidspunkt gælde, at den tilførte varmestrøm er lig med den bortledte varmestrøm, idet der medregnes den varmeeffekt, der tilføres eller afgives fra varmeakkumulerende bygningsdele.

Varmebalancen kan benyttes til at beregne det termiske indeklima, og dermed bestemme de nødvendige luftmængder, som ventilationsanlægget skal levere for at skabe tilfredsstillende temperaturforhold. Til løsning af denne opgave kan benyttes tre metoder:

- 1) Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi)
- 2) Døgnmiddelindetemperatur
- 3) Beregninger på timebasis med dynamiske simuleringsprogrammer

Ønskes en detaljeret beregning af termisk indeklima ved projektering af bygninger, bliver metode 3 anvendt med brug af et dynamisk simuleringsprogram, hvor temperaturforhold og energiforbrug beregnes på timebasis. Et dynamisk program vil således kunne beregne et af kravene om, at der højst må være en temperatur på over henholdsvis 26 °C 100 timer og 27 °C 25 timer i arbejdstiden i løbet af året. Det viser sig imidlertid, at dette kan give høje resultater for temperaturen i sommermånederne, og det kan derfor anbefales, også at se på antallet af timer over 25 °C, for at få en bedre vurdering af problemer med eventuelle overtemperaturer. En anden fordel ved en dynamisk beregning er, at temperaturen om morgenen kan beregnes relativt præcist således, at anvendelse af nattekøling kan tilpasses så morgentemperaturen ikke bliver for lav. Dette vil ikke være muligt med de to andre metoder, som er mere forenklede.



Figur 12-8 Den samlede varmebalance for et rum

Der kan også anvendes metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" i den indledende fase og således dimensionere efter en døgnmiddelindetemperatur på 23 °C.

En detaljeret analyse ved brug af metode 3 med dynamiske programmer BSim, IDA ICE, etc. kræver imidlertid en del specialkompetence. For at få mulighed for at udføre en enkel tilnærmet beregning af det termiske indeklima foreslås brugen af metode 1 "Maksimal timemiddelindetemperatur" og metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" til at anslå strategien for ventilationen af bygningen, som beskrevet ovenfor.

De tre metoder, der fokuseres på i dette kapitel, bliver gennemgået i de følgende tre afsnit:

- Afsnit 12.13 – Maksimal timemiddelindetemperatur – Metode 1
- Afsnit 12.14 – Døgnmiddelindetemperatur – Metode 2
- Afsnit 12.15 – Dynamiske simuleringsprogrammer – Metode 3

Hvis der anvendes metode 1 med "Maksimal timemiddelindetemperatur" (Øjebliksværdi) med den dertil hørende dimensionsgivende varmeeffekt, fås i de fleste tilfælde alt for store værdier.

For at få mere præcise resultater og dermed bedre energiøkonomiske løsninger, anvender rådgivere i forbindelse med projektering metode 3, "Dynamiske simuleringsprogrammer" til beregning af temperaturforhold og energiforbrug på timebasis, f.eks. BSim, IDA ICE, Energy+, Archsim. Denne metode vil imidlertid for mere traditionelle bygninger være relativt tidskrævende og vil derfor ikke altid blive benyttet.

Hvilken metode der anvendes afhænger i høj grad af den stillede opgave, og hvilke krav der stilles til resultaterne. Problemstillingen kan sammenlignes med en bueskytte, der skyder til måls efter en skive med forskellige cirkler, der bliver større og større. Den inderste cirkel kræver en meget detaljeret præcis analyse med metode 3 med et dynamisk simuleringsprogram, hvor resultaterne vurderes meget nøje. Er kravene mere løse, og der kun kræves, at der rammes inden for skiven, kan metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" med fordel benyttes.

Uanset hjælper det ikke noget at benytte metode 3 med et dynamisk simuleringsprogram, hvis personen, som udfører beregningerne, ikke har de nødvendige kvalifikationer. Dette kan resultere i, at udfaldet rammer helt ved siden af skiven, uden at nogen opdager det, fordi der er anvendt et fint dynamisk simuleringsprogram, og dokumentationen er mangelfuld. En kort rapport baseret på et dynamisk simuleringsprogram, der viser antallet af timer under 26 °C, er ikke nogen dokumentation på, at de udførte beregninger er korrekte! En hurtig supplerende beregning med metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” kan være en god kontrolregning.

Hvis der fra bygherrens side stilles meget specifikke krav om f.eks. antal timer over 26 °C / 27 °C i arbejdstiden, minimumstemperatur om morgenen, etc. kan metode 1 og 2 ikke benyttes.

Hvis projektet er i en indledende fase, hvor der kun ønskes et overslag for ventilationsanlæggets størrelse kan de enklere metoder anvendes:

- Metode 1 – Maksimal timemiddelindetemperatur
- Metode 2 – Døgnmiddelindetemperatur

Hvis der fokuseres på den værste time med brug af metode 1 ”Maksimal timemiddelindetemperatur” vil det resultere i overdimensionerede anlæg og dermed fordyrelse af det samlede projekt, og et anlæg der ikke kører optimalt i den normale driftstilstand. Anvendelse af metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” for en varm skyfri dag vil resultere i lavere ventilationsluftmængder afhængig af den valgte strategi.

Ved analyse af et lokale med en meget stor konstant intern varmebelastning over en koncentreret periode på nogle timer i kombination med en lille ekstern varmebelastning fra solindfald vil den interne varmebelastning blive den dominerende faktor. Her vil den akkumulerende masse have begrænset indvirkning på resultatet. Dette kan være aktuelt ved analyse af et auditorium, hvor den store interne varmebelastning fra personer over nogle timer vil være dominerende, og i dette tilfælde kan metode 1 ”Maksimal timemiddelindetemperatur” være velegnet, hvorimod metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” skal benyttes med stor forsigtighed, og muligvis vil give for lave resultater. Det bedste resultat vil blive opnået ved anvendelse af metode 3 med en dynamisk simulering; men dette vil også være langt mere tidskrævende, og muligvis ikke give så meget lavere ventilationsluftmængder.

Ved anvendelse af de mere detaljerede dynamiske indeklimate simuleringer opnås den største præcision og de mest optimale størrelser på ventilationsanlægget og de mindste ventilationsluftmængder. Det giver således en god gevinst at bruge ekstra tid på anvendelse af dynamiske indeklimate simuleringer. Det er dog vigtigt at gøre opmærksom på, at der er en række faldgrupper ved anvendelse af dynamiske indeklimate simuleringer, hvor der kun fokuseres på at beregne alle årets timer med tilhørende antal timer over 26 °C/27 °C.

En anden problemstilling er de opstillede krav fra bygherren. Er disse krav overhovedet rimelige eller vil de give anledning til meget overdimensionerede ventilationsanlæg. Et eksempel kan være en bygherre, der ønsker sin bygning dimensioneret til 500 personer og alle de 500 personer er på arbejde 100% i 11 timer pr. dag mandag til fredag hele året rundt. Dette vil give en helt urealistisk belastning på bygningen samt resultere i overdimensionerede ventilationsanlæg, der ikke vil køre



optimalt og være dyre i indkøb og i drift. Her vil det fra rådgiverens side være tilrådeligt at gå ind i en dialog med bygherren angående disse urealistiske krav og finde baggrunden for kravene. Hvad er baggrunde for kravene? Måske er kravene blot en afskrift af krav fra andre byggerier, uden at der i det pågældende tilfælde er foretaget en konkret vurdering. Alternativt kan rådgiveren komme med to forslag: 1) Baseret på de urealistiske krav, 2) Egne opstillede rimelige krav.

### *Baggrund for anvendelse af beregninger i byggeprocessen*

Sædvanligvis vil en bygherre ansætte en rådgiver til at udarbejde udbudsmaterialet for en given bygning, og denne rådgiver vil i mange tilfælde anvende dynamiske indeklimate simuleringer for at beregne det termiske indeklima i bygningen. Resultatet af disse beregninger bliver efterfølgende dokumenteret i en mindre rapport, hvoraf det i en tabel fremgår, hvor mange antal timer temperaturen er over 26 °C/27 °C. På denne baggrund ser det ud til, at det termiske indeklima er opfyldt. Efterfølgende bliver bygningen sendt i udbudsrunde, hvor en række konsortier byder ind sammen med deres rådgivere.

Når et konsortium efterfølgende har vundet udbudsrunden vil de bede deres rådgivere om at detailprojektere bygningen. Da den nye rådgiver ofte kun har adgang til den korte rapport med en tabel over antal timer over 26 °C/27 °C, og dermed ikke har adgang til basis materialet for de udførte dynamiske indeklimate simuleringer; vil det være umuligt at vide om beregninger er i orden. I almindelighed vil det være en tillidssag om den nye rådgiver har tiltro til de oprindelige simuleringer eller vil gå i gang forfra med sine egne simuleringer. Dette resulterer i et dobbeltarbejde.

### **Kravspecifikationer til indeklimaklasser**

Dette og det følgende afsnit hører egentlig hjemme under metode 3 ”Dynamiske simuleringsprogrammer”; men da dele af informationerne er relevante for metode 2 ”Døgnmiddelinde temperatur” er det valgt at inkludere afsnittene her.

Der er i (Branchevejledning for indeklimateberegninger, 2017) udarbejdet kravspecifikationer til indeklimateklasserne ved de dimensionerende forhold (Tabel 12-19) og disse inkluderer toleranceoverskridelser med hensyn til antal timer over specifikke temperaturer for den operative temperatur (Tabel 12-20, denne tabel vedrører kun metode 3).

### **Temperaturforhold**

For en given bygning har den akkumulerende masse stor betydning for hvor stor temperatur udsvinget vil være i løbet af en dag. For tunge bygninger med en høj anvendelse af beton vil der være en stor akkumulerende masse, der vil bidrage til at dæmpe temperatursvingningerne. Dette vil være med til at give et mere behageligt termisk indeklima, eftersom temperatursvingninger i høj grad er noget, der klages over, hvorfor det bør underkastes et nøje eftersyn ved vurderingen af resultater. Lette bygninger giver anledning til store temperatursvingninger, da der ikke er nogen nævneværdig akkumulerende masse. Det er derfor af stor betydning for lette rum at undgå et stort solindfald og stor intern varmeudvikling.

*Tabel 12-19. Kravspecifikationer til indeklimaklasserne for erhverv og andet ved dimensionerende forhold. (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).*

<b>Indeklimaklasse</b>	<b>Minimum</b>	<b>Standard</b>	<b>Ambitiøs</b>
<i>Operativ temperatur i °C</i>			
-sommer (maj – september)	22,0-27,0	22,0-26,0	22,5-25,5
-overgang (april og oktober)	21,0-27,0	21,0-26,0	21,0-25,5
-vinter (november – marts)	21,0-25,0	21,0-24,5	21,0-24,0
<i>Træk og lufthastigheder</i>			
Trækrisiko (draught rate), maks. <sup>1</sup>	25 %	20 %	15 %
<i>Solafskærmningstid i procent af brugstiden</i>			
Andel af brugstid, hvor afskærmningen er aktiv <sup>2</sup>	30 %	20 %	12 %
<i>Atmosfærisk indeklima i ppm</i>			
CO <sub>2</sub> -koncentration (udeniveau på 400 ppm)	1200 <sup>3</sup>	1000	900

<sup>1</sup> For rum med stillesiddende aktivitet stiller bygningsreglementet krav om en maksimal trækrisiko på 20 %. Trækrisiko vurderes for udvalgte situationer og ikke som en del af indeklimasimuleringen.

<sup>2</sup> Der evalueres kun på den del af brugstiden, der ligger mellem kl. 7 og kl. 18. For afskærmninger med delvis udsyn kan benyttes vægtningsfaktorer angivet i Tabel 12-12 og Tabel 12-13.

<sup>3</sup> I dagsinstitutioner og undervisningsrum i skoler og lignende stiller Bygningsreglementet krav til maksimalt 1000 ppm for dimensionerende forhold.

*Tabel 12-20. Toleranceoverskridelser, som er ens for indeklimaklasser Minimum, Standard og Ambitiøs i forhold til de opstillede krav til den operative temperatur. (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).*

<b>Toleranceoverskridelser for operativ temperatur</b>	<b>ved 5 arbejdsdage pr uge</b>	<b>ved 7 arbejdsdage pr uge</b>
<i>Sommer og overgangsperiode (april – oktober)</i>		
-timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	Maks. 100 timer	Maks. 140 timer
-timer m. overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	Maks. 25 timer	Maks. 35 timer
<i>Vinterperiode (november – marts)</i>		
-timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	Maks. 50 timer	Maks. 70 timer
-timer m. overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	Maks. 10 timer	Maks. 14 timer

En stor udnyttelse af den termiske masse i et byggeri resulterer i mindre anlæg og et lavere dimensionerende luftskifte for ventilation. Jo større temperaturvariation, der kan accepteres, jo lavere energiforbrug og mindre anlæg kan opnås. Specielt kan opmærksomheden henledes på udnyttelse af ventilationsanlægget til nattekøling, hvor den lave udetemperatur kan benyttes til at blæse ind i bygningen og dermed fjerne den akkumulerede varme i løbet af dagen fra bygningen. Den største virkning opnås ved at køle bygningen ned så lavt som det kan accepteres, f. eks. 22°C, der er den laveste temperatur ifølge Tabel 12-19 kravspecifikationer til indeklimaklasserne for henholdsvis for minimum og standard.

Set i lyset med de globale udfordringer med CO<sub>2</sub> udslip og klodens generelle opvarmning er det spørgsmålet, om ikke det bør vurderes for de varmeste skyfri sommerdage at mindske den laveste temperatur til f.eks. 21°C. Dette vil resultere i, at der er 1°C mere at kunne give en temperaturglidning op imod de 26°C (Tabel 12-19, indeklimaklasse standard). En udnyttelse af den termiske masse med 5°C (26°C – 21°C) i forhold til 4°C (26°C – 22°C) vil give en lavere dimensionerende ventilationsluftmængde, et mindre ventilationsanlæg og spare energi.

Ulempen vil være, at der på meget varme sommerdage nogle enkelte dage om året vil være behov for at køle bygningen ned til 21°C. Det er spørgsmålet om ikke det kan være rimeligt for virksomheder, der gerne vil have en grøn profil og tænke energiøkonomisk, at de inkluderer deres personale i disse bestræbelser. Ifølge Tabel 12-19 er kravspecifikationerne for indeklimaklasse Ambitiøs for sommeren på 22,5 – 25,5°C, og dette skal ses i forhold til, at der er virksomheder, hvor personalet klager hvis temperaturen kommer under 23°C. Spørgsmålet er, om det er rimeligt, at dimensionere anlæggene så de kan afhjælpe, at temperaturen aldrig kommer under 23°C om sommeren. Det er afgørende for opnåelse af et lavt energiforbrug, at brugeradfærden i højere grad bliver inkluderet, og personalet i bygninger bliver vejledt i, hvorledes de skal agere i en given bygning. F.eks. findes der mange automatiske udvendige solafskærmninger, der kan overstyres af brugerne, og hvis de prioriterer udsynet højere og overstyrer solafskærmningen det meste af dagen, kan dette i værste fald give en markant større solbelastning ind i bygningen.

Hvis kravspecifikationerne skal overholdes hele året, vil det give anledning til meget overdimensionerede anlæg, og dette vil være u hensigtsmæssigt. Der er derfor tilladt toleranceoverskridelser, der svarer til ca. 5 % af brugstiden. Dette krav gælder for den øvre temperaturgrænse og timerne summeres for følgende to perioder:

- April – oktober
- November – marts

Ved beregninger af det termiske indeklima benyttes for hele året den samme belastning og brugstid.

### 12.13. Maksimal timemiddelindetemperatur

Ved beregning af de nødvendige luftmængder vil ”3. Termisk indeklime” i de fleste tilfælde give den største værdi.

Den enkleste metode til at beregne den nødvendige volumenstrøm  $q_v$  for termisk indeklime er at gøre brug af Metode 1 – Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi). Metodens navn er valgt ud fra, at der opstilles en varmebalance for den varmeste time med en maksimal udsugningstemperatur  $\theta_{ud}$  fra ventilationsanlægget. Denne temperatur kan være den samme som rumtemperaturen  $\theta_{rum}$ , hvis der er en god opblanding i rummet.

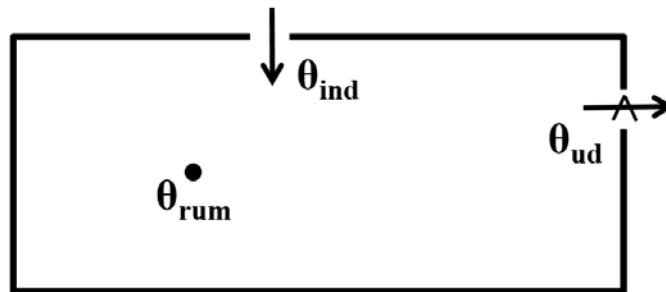
I den enkle varmebalance ses det aktuelle kølebehov  $\Phi_{køle}$  i forhold til ventilationsanlæggets evne til at fjerne den varme indeluft baseret på udtrykket:  $\rho \cdot c \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})$ , hvilket giver:

$$\Phi_{køle} = \rho \cdot c \cdot q_v \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})$$

$$\Leftrightarrow q_v = \frac{\Phi_{køle}}{\rho \cdot c \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})}$$

Ligning 12-17

Her er luftens specifikke varmekapacitet lig:  $c = 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg luft} \cdot \text{K})$  og  $(\rho \cdot c) \approx 1207 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{K})$ . Temperaturforskellen i parentesen udtrykker ventilationsluftens temperaturændring gennem rummet, hvilket er illustreret på Figur 12-9.



Figur 12-9 Temperaturer, der indgår i varmebalancen, og benyttes til definition af temperatureffektivitet

I et lokale med en god opblanding regnes med en konstant temperatur i lokalet, og dette medfører at udsugningstemperaturen  $\theta_{ud}$  har samme værdi som rumtemperaturen  $\theta_{rum}$ . Dette resulterer i en temperatureffektivitet  $\varepsilon_{\theta} = 1$ , se definition i Ligning 12-18.

Hvis der derimod ikke er så god en opblanding, indføres en temperatureffektivitet  $\varepsilon_{\theta}$  defineret på følgende måde:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\theta_{ud} - \theta_{ind}}{(\theta_{rum} - \theta_{ind})}$$

Ligning 12-18

Ligningen udtrykker temperaturændringen fra indblæsning til udsugning i forhold til temperaturændringen fra indblæsning til et nærmere defineret sted i rummet.

Ved indsættelse af temperatureffektivitet  $\varepsilon_{\theta}$  i Ligning 12-17 fås:

$$\Phi_{køle} = \varepsilon_{\theta} \cdot \rho \cdot c \cdot q_V \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})$$

$$\Leftrightarrow q_V = \frac{\Phi_{køle}}{\varepsilon_{\theta} \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})}$$

Ligning 12-19

Ligningen er aktuell ved f.eks. fortrængningsventilation, hvor der forekommer en rumtemperatur, som er lavere end udsugningstemperaturen, og dette resulterer i at  $\varepsilon_{\theta} > 1$ , hvorved den nødvendige volumenstrøm til at bortventilere den aktuelle varmebelastning bliver reduceret.

En udsugningstemperatur  $\theta_{ud}$  på 26°C anvendes i en del tilfælde og en indblæsningstemperatur på  $\theta_{ind}$  på 16°C, hvilket giver en temperaturforskel på 10°C. Det er en vurderingssag om så høj en underafkøling er i orden, hvilket afhænger af opblandingen i lokalet og armaturet. Fabrikanten af armaturet kan oplyse den maksimale underafkølede temperatur for indblæsning som det aktuelle armatur kan håndtere – Denne kan f.eks. være 8°C.

### Anvendelse af Maksimal timemiddelindetemperatur

Anvendelse af Ligning 12-17, Metode 1 – Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi) skal ske med stor varsomhed, da den har en tendens til at give alt for store værdier, og dermed overdimensionere ventilationsanlægget med helt op til 30-60 %. En måde at kompensere for dette er ved at reducere solindfaldet med en faktor 0,7 for at tage hensyn til, at en del af solvarmen bliver akkumuleret i bygningskonstruktionerne. Den reelle faktor vil afhænge af, om det er en let eller en tung bygning. I de tilfælde, hvor det er en tung bygning, kan det være fornuftigt at benytte den foreslåede faktor på 0,7 ganget på sol belastningen. Dette hænger sammen med, at solindfaldet på de varmeste timer vil give en alt for overdimensioneret tilstand, da døgnmiddelværdien for solindfaldet vil være langt lavere. Der bør imidlertid udvises forsigtighed, hvis der anvendes en udvendig solafskærmning med lav afskærmningsfaktor (det meste af solindfaldet lukkes ud), og denne yderligere ganges med en faktor på 0,7. Dermed kan belastningen fra solindfaldet i den aktuelle time blive meget lavere end for en time lige før eller efter den udvendige solafskærmning anvendes. I tilfælde med en meget konstant varmebelastning i løbet af dagen, hvor varierende solindfald ikke har så stor betydning, kan det være fornuftigt at anvende formelen.

I langt de fleste tilfælde vil det give mere præcise værdier, at anvende Metode 2 – Døgnmiddelindetemperatur eller Metode 3 – Dynamiske simuleringsprogrammer.

## 12.14. Døgnmiddelindetemperatur

Det kan være en god ide at anvende metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”, som et indledende overslagsmæssigt bud på de ønskede ventilationsluftmængder. De beregnede luftmængder kan derpå eventuelt sammenlignes med de luftmængder, som fremkommer ved brug af metode 1 med ”Maksimal timemiddelindetemperatur”.

På tilsvarende vis kan det være en god ide at benytte metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” til en vurdering af beregnede resultater ved brug simuleringsprogrammer til beregning af termisk indeklima og energiforbrug på timebasis (BSim, IDA ICE, IES-VE eller andre).

Simuleringsprogrammer til beregning af termisk indeklima og energiforbrug har mange faciliteter og muligheder; men der er også mange faldgrupper, da det kan være vanskeligt at overskue alle de mange input-data. Der kan let forekomme fejl.

Metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” skal dog benyttes med varsomhed, da det kun er en døgnmiddelindetemperatur, som beregnes. Det giver fornuftige resultater for et lokale med en normal varmebelastning, og hvis det er en tung bygning med en stor termisk masse til at akkumulere den overskydende varme. En let bygning vil have større temperaturudsving, og dette resulterer i en større usikkerhed, og metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” giver et mere usikkert resultat, da det kan være vanskeligt at vurdere temperaturudsvingene.

I det følgende gennemgås teori for beregning af døgnmiddelindetemperatur.

I 12.11 blev udetemperaturens døgnvariation angivet som en cosinusfunktion med f.eks. maksimum klokken 14.

I Tabel 12-17 er der en oversigt over maksimal døgnmiddeludetemperatur og typisk variation over døgnet. For juni måned haves følgende værdier:

- Maksimal døgnmiddeludetemperatur = 20°C
- Typisk variation over døgnet = 6°C

Ved omskrivning til ligning bliver dette:  $\theta_u = 20^\circ\text{C} \pm 6^\circ\text{C}$

Denne formel kan anvendes for den udvendige døgnvariation på en meget varm skyfri sommerdag i Danmark. Ved vurdering under danske forhold kan foreslås at benytte en døgnmiddeludetemperatur på 20°C for hele sommerperioden for at gøre det enklere, fremfor at benytte 21°C i juli og 20,5°C i august.

### Løsning af varmebalanceligningen

I den enkleste form, hvor der ikke tages hensyn til varmeakkumulering i bygningskonstruktioner, gælder, at den tilførte varmestrøm er lig med den bortledte varmestrøm. Denne tilnærmelse kan benyttes ved beregning af døgnmiddelindetemperaturen i sluttilstanden, som optræder efter mange døgn med de samme forhold – hvilket teoretisk først vil ske efter uendelig mange døgn. I praksis afhænger antallet af døgn for sluttilstanden af mange faktorer. Hvis der f.eks. er installeret et

ventilationsanlæg med tilstrækkelig kølekapacitet til at holde en maksimal temperatur på f.eks. 26°C, vil slutttilstanden indtræde efter få døgn. Se også afsnittet om *Tidskonstanten*.

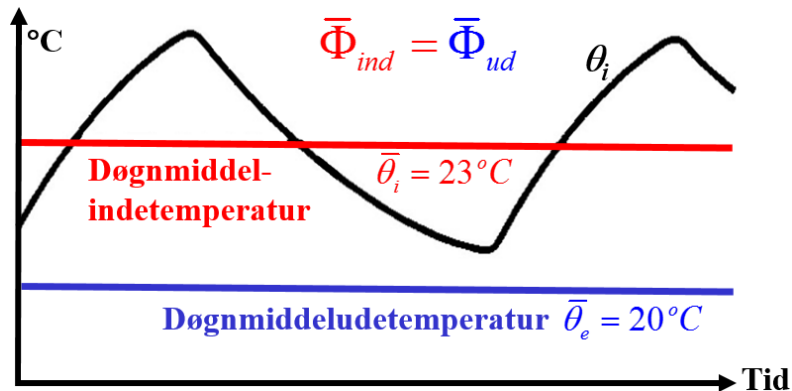
I den døgnstationære tilstand er den varmemængde, der tilføres i løbet af et døgn, lig den varmemængde, der bortledes i løbet af et døgn:

$$\bar{\Phi}_{\text{tilført}} = \bar{\Phi}_{\text{bortledt}} \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}}$$

Ligning 12-20

På Figur 12-10 er illustreret døgnmiddelindetemperatur og døgnmiddeludetemperatur for et rum.

I sommersituationen på en skyfri sommerdag vil der være en stor ekstern varmebelastning fra solstråling, som normalt ikke kan bortledes ved transmission eller ventilation. En del af den tilførte varme vil derfor blive i form af en forøgelse af rummets lufttemperatur og akkumulering i bygningskonstruktionerne.



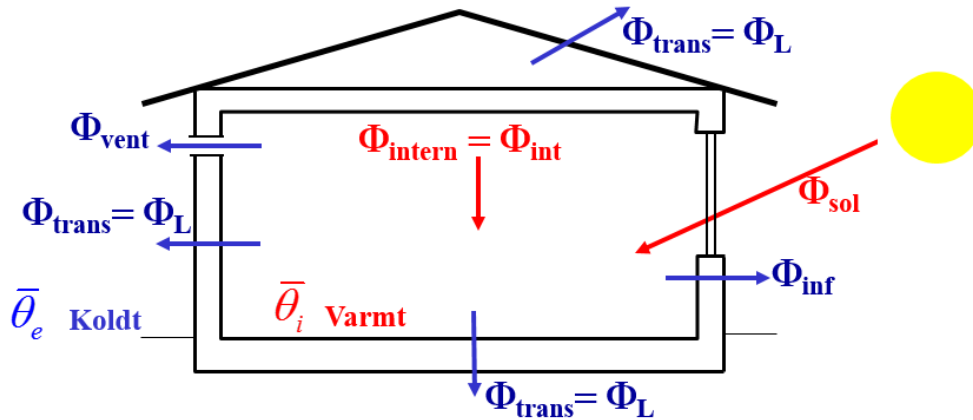
Figur 12-10 Illustration af døgnmiddelindetemperatur og døgnmiddeludetemperatur for et rum

Bestemmelse af døgnmiddelindetemperatur, giver på en enkel måde en idé om temperatur niveauet i et rum og om hvilke tiltag, der kan gøres for at forbedre det termiske indeklima. Størrelserne for de enkelte tiltag er lette at vurdere, og dermed hvilke der har stor betydning, og hvilke som har mindre betydning. Dette er et overblik, som let kan mistes ved kun at anvende dynamiske simuleringsprogrammer.

Ved at indlægge formlerne i et regneark forbedres overblikket. Dette kan gøres i forbindelse med forberedelserne til beregninger med dynamiske simuleringsprogrammer, hvor interne belastninger skal vurderes.

Til døgnmiddelindetemperatur skal lægges døgnamplitude – afhængig af rummets varmekapacitet, belastningernes størrelse og ventilationsanlæggets kapacitet.

For et tungt rum med stor varmeakkumulerende masse og lille belastning vil der komme en indetemperatur amplitude på nogle få grader.



Figur 12-11 Den samlede varmebalance for et rum med nogle af de indgående parametre

For et let rum med lille varmeakkumulerende masse og stor belastning vil der komme en stor indetemperatur amplitude på mange grader.

På Figur 12-11 er vist den samlede varmebalance for et rum med nogle udvalgte elementer i varmebalancen. Den blå og den røde farve illustrerer, hvorledes de indregnes i Ligning 12-20:

$$\bar{\Phi}_{\text{tilført}} = \bar{\Phi}_{\text{bortledt}} \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} = \bar{\Phi}_L + \bar{\Phi}_{L,\text{nabo}} + \bar{\Phi}_{\text{inf}} + \bar{\Phi}_{\text{vent}} + \bar{\Phi}_{\text{natkol}} + \bar{\Phi}_{\text{luft,nabo}} \quad \text{Ligning 12-21}$$

De enkelte bidrag i Ligning 12-21 kan udspecificeres i tilført og bortledt effekt.

### Tilført effekt

#### Intern varmebelastning

Tilført effekt fra intern varmebelastning fra person, udstyr og belysning,  $\Phi_{\text{int}}$  (W),  $Q_{\text{int}}$  (Wh):

$$\bar{\Phi}_{\text{int}} = \frac{Q_{\text{int}} \text{ pr døgn}}{24h / \text{døgn}} = \frac{Q_{\text{int}}}{24h} \quad \text{Ligning 12-22}$$

#### Ekstern varmebelastning

Tilført effekt fra ekstern varmebelastning fra sol,  $\Phi_{\text{sol}}$  (W),  $Q_{\text{sol}}$  (Wh):

$$\bar{\Phi}_{\text{sol}} = \frac{Q_{\text{sol}} \text{ pr døgn}}{24h / \text{døgn}} = \frac{Q_{\text{sol}}}{24h} \quad \text{Ligning 12-23}$$



### Bortledt effekt

#### Ledning mellem indvendig og til det fri

Bortledt effekt ved ledning mellem indvendig og til det fri,  $\Phi_L$  (W),  $H_L$  (W/K):

$$\bar{\Phi}_L = (\Sigma U \cdot A) \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) = H_L \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e)$$

$$H_L = \sum_n^{i=1} (U_1 \cdot A_1 + U_2 \cdot A_2 + \dots + U_n \cdot A_n)$$

Ligning 12-24

#### Ledning mellem indvendig og til naborum

Bortledt effekt ved ledning mellem indvendig og til naborum,  $\Phi_{L,nabo}$  (W),  $H_{L,nabo}$  (W/K):

$$\bar{\Phi}_{L,nabo} = \sum_n^{i=1} \left[ (U_{L,nabo,1} \cdot A_{L,nabo,1} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{nabo,1})) \right] + \dots + \left[ (U_{L,nabo,n} \cdot A_{L,nabo,n} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{nabo,n})) \right]$$

$$H_{L,nabo} = \sum_n^{i=1} (U_{L,nabo,1} \cdot A_{L,nabo,1} + U_{L,nabo,2} \cdot A_{L,nabo,2} + \dots + U_{L,nabo,n} \cdot A_{L,nabo,n})$$

Ligning 12-25

### Luftudveksling af forskellige slags

Bortledt effekt ved luftudveksling af forskellige slags. Princippet gennemgås generelt for alle luftstrømme. Bemærk formlen ændres afhængig om der anvendes en volumenstrøm i (m<sup>3</sup>/h) eller i (l/s). I det følgende vil formlen blive vist i enhederne – q<sub>V</sub> (l/s), q<sub>V(h)</sub> (m<sup>3</sup>/h),  $\Phi_{luft}$  (W),  $H_{luft}$  (W/K):

$$\bar{\Phi}_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft}) = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft})$$

$$\bar{\Phi}_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft})$$

$$H_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \quad q_{V(h)} [m^3 / h]$$

$$H_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} = 0,34 \cdot (3,6 \cdot q_V) \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \quad q_V [l / s]$$

Ligning 12-26

### Infiltration

Bortledt effekt ved infiltration,  $\Phi_{inf}$  (W),  $H_{inf}$  (W/K):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{inf} &= 0,34 \cdot n_{inf} \cdot V \cdot \frac{h_{inf}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{inf}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) \\ H_{inf} &= 0,34 \cdot n_{inf} \cdot V \cdot \frac{h_{inf}}{24 h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{inf}}{24 h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{inf}}{24 h} \\ q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad &Temperatur : \bar{\theta}_e\end{aligned}$$

*Ligning 12-27*

### Ventilation

Bortledt effekt ved ventilation,  $\Phi_{vent}$  (W),  $H_{vent}$  (W/K):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{vent} &= 0,34 \cdot n_{vent} \cdot V \cdot \frac{h_{vent}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{vent}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{vent}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{vent}) \\ H_{vent} &= 0,34 \cdot n_{vent} \cdot V \cdot \frac{h_{vent}}{24 h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{vent}}{24 h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{vent}}{24 h} \\ q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad &Temperatur : \bar{\theta}_{vent}\end{aligned}$$

*Ligning 12-28*

### Nattekøling

Bortledt effekt med nattekøling,  $\Phi_{natkøl}$  (W),  $H_{natkøl}$  (W/K):

(Nattekøling foregår ved at benytte den kølige natteluft og blæse den ind i bygningen om natten for at få en gratis frikøling)

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{natkøl} &= 0,34 \cdot n_{natkøl} \cdot V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{natkøl}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{natkøl}) \\ H_{natkøl} &= 0,34 \cdot n_{natkøl} \cdot V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24 h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{natkøl}}{24 h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24 h} \\ q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad &Temperatur : \bar{\theta}_{natkøl}\end{aligned}$$

*Ligning 12-29*

### Luftudveksling med naborum

Bortledt effekt ved luftudveksling med naborum. Princippet gennemgås generelt kun for ét rum fremfor for  $n$  naborum. Princippet for formlen for  $n$  naborum er gennemgået tidligere for *Ligning 12-25 Bortledt effekt ved ledning mellem indvendig og til naborum.*, og dette kan overføres på luftudveksling til en række naborum. I det følgende opstilles formlerne kun for ét enkelt rum for at forenkle formlerne,  $\Phi_{\text{luft,nabo}}$  (W),  $H_{\text{luft,nabo}}$  (W/K):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{\text{luft,nabo}} &= 0,34 \cdot n_{\text{luft,nabo}} \cdot V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) \\ H_{\text{luft,nabo}} &= 0,34 \cdot n_{\text{luft,nabo}} \cdot V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24 h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24 h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24 h} \quad \text{Ligning 12-30} \\ q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad \text{Temperatur: } \bar{\theta}_{\text{nabo}}\end{aligned}$$

### Udetemperatur angivet ved en cosinusfunktion

Hvis der ikke findes klimadata for den pågældende lokalitet, eller det ikke er praktisk at anvende referenceåret, kan udetemperaturen angives ved en cosinusfunktion med maksimum f.eks. klokken 14 ( $\tau_{h,\max} = 14$ ):

$$\theta_u = \bar{\theta}_u + \Delta\theta_u \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi (\tau_h - 14)}{24} \quad \text{Ligning 12-31}$$

### Løsning af varmebalanceligningen

På baggrund af specificering af de enkelte parametre kan varmebalanceligningen løses:

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{\text{tilført}} &= \bar{\Phi}_{\text{bortledt}} \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} = \bar{\Phi}_L + \bar{\Phi}_{L,\text{nabo}} + \bar{\Phi}_{\text{inf}} + \bar{\Phi}_{\text{vent}} + \bar{\Phi}_{\text{natkøl}} + \bar{\Phi}_{\text{luft,nabo}} \\ \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} &= H_L \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) + H_{\text{inf}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) + H_{L,\text{nabo}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) \\ &\quad H_{\text{vent}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{vent}}) + H_{\text{natkøl}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{natkøl}}) + H_{\text{luft,nabo}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) \\ \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} &= (H_L + H_{\text{inf}} + H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{vent}} + H_{\text{natkøl}} + H_{\text{luft,nabo}}) \cdot \bar{\theta}_i \\ &\quad - (H_L + H_{\text{inf}}) \cdot \bar{\theta}_e - H_{\text{vent}} \cdot \bar{\theta}_{\text{vent}} - H_{\text{natkøl}} \cdot \bar{\theta}_{\text{natkøl}} - (H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{luft,nabo}}) \cdot \bar{\theta}_{\text{nabo}} \\ \Leftrightarrow \bar{\theta}_i &= \frac{(H_L + H_{\text{inf}}) \cdot \bar{\theta}_e + H_{\text{vent}} \cdot \bar{\theta}_{\text{vent}} + H_{\text{natkøl}} \cdot \bar{\theta}_{\text{natkøl}} + (H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{luft,nabo}}) \cdot \bar{\theta}_{\text{nabo}} + \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}}}{(H_L + H_{\text{inf}} + H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{vent}} + H_{\text{natkøl}} + H_{\text{luft,nabo}})}\end{aligned}$$

Hvorved ligning for døgnmiddelindetemperaturen fås:

$$\bar{\theta}_i = \frac{(H_L + H_{inf}) \cdot \bar{\theta}_e + H_{vent} \cdot \bar{\theta}_{vent} + H_{natkol} \cdot \bar{\theta}_{natkol} + (H_{L,nabo} + H_{luft,nabo}) \cdot \bar{\theta}_{nabo} + \bar{\Phi}_{int} + \bar{\Phi}_{sol}}{(H_L + H_{inf} + H_{L,nabo} + H_{vent} + H_{natkol} + H_{luft,nabo})}$$

Ligning 12-32

I denne ligning er der medtaget en lang række parametre for at gøre den bredere anvendelig.

Formlen ville selvfølgelig komme på enklere form, hvis disse parametre ikke var medtaget.

Hvis kun varmebelastningerne og varmeudvekslingen med udeluften medtages, forenkles formelen til:

$$\bar{\theta}_i = \bar{\theta}_e + \frac{\bar{\Phi}_{int} + \bar{\Phi}_{sol}}{H_L + H_{inf}}$$

Ligning 12-33

## Anvendelse af metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”

Formlerne Ligning 12-21 til Ligning 12-30 og Ligning 12-32 er velegnede til at få et overblik over de enkelte størrelser, der indgår i varmebalancen. De største bidrag til den interne eller eksterne belastning er relevante at vurdere, hvorimod de mindre bidrag ikke bør have så stor fokus. Dette er en af fordelene ved metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”, at det er enkelt at overskue de indgående parametre og deres betydning. Det kan derfor ved anvendelse af metode 3 ”Dynamiske simuleringsprogrammer” være en god ide i tillæg at benytte metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” for at få et bedre forståelse af bygningen og dens dynamik. På denne måde kan mange faldgrupper ved metode 3 undgås.

Anvendelse af metode 2 er under forudsætning af, at der ikke fra bygherres side er stillet krav om en detaljeret beregning af det termiske indeklima med specifikke krav om f.eks. antal timer over 26 °C og 27 °C, en minimumstemperatur om morgene, etc.

Styrken ved metode 2 er, at der på kort tid kan beregnes et kvalificeret skøn over de nødvendige luftmængder til de enkelte lokale. Dette vil i mange tilfælde være tilstrækkeligt i et forprojekt stadie, hvor der kun ønskes et skøn over dimensionerne for kanalerne og ventilationsanlæggets størrelse.

Metode 2 kan ikke anvendes til at vurdere de energimæssige løsninger, da dette kræver årssimuleringer, og dette kan f.eks. ske ved brug af metode 3, ”Dynamiske simuleringsprogrammer”.

### *Vurdering af resultat*

Hvis der i et projekt for en **tung bygning** anvendes en **udvendig solafskærmning**, og der er **moderate interne varmelastninger**, vil det være muligt med metode 2

”Døgnmiddelindetemperatur”, at få nogle resultater tilnærmede resultater. Dette kan opnås ved, at der tilstræbes en døgnmiddelindetemperaturen er på **23 °C** eller lidt mindre. Under disse forhold kan det forventes, at temperaturen er over henholdsvis 26 °C max 100 timer per år og 27 °C max 25 timer per år.

Anvendelse af solafskærmende ruder med en lav g-værdi, i stedet for en udvendig solafskærmning, kan tillige forventes at give rimelige resultater; men dette er ikke grundigt dokumenteret. Det kan imidlertid resultere i et forøget kølebehov, da der ikke vil være nogen effektiv solafskærmning i de solrigeste timer med det største kølebehov. Et større kølebehov vil resultere i større ventilationsanlæg. Hvis denne løsning ønskes anvendt bør det kun ske efter en grundig undersøgelse med et dynamisk simuleringsprogram på timebasis.

Det fremgår af Tabel 12-19, at den operative temperatur ikke bør komme under 22 °C om sommeren. Dette krav kan ikke umiddelbart dokumenteres ved brug af metode 2. Det kan imidlertid forventes ved beregning med en døgnmiddelindetemperaturen på 23 °C, ventilation i maksimalt 10 timer og nattekøling i maksimalt 5 timer, at kravet om 22 °C er tæt at være opfyldt. Dette hænger blandt andet sammen med, at der ved ophør af nattekøling umiddelbart efter sker en temperaturstigning på 1-2 °C. Årsagen til dette er den store interne varmemængde, der er akkumuleret i bygningskonstruktionerne, hvilket resulterer i, at bygningskonstruktionerne kommer til at fungere som en stor kæmpevarmeplade. Det er imidlertid nødvendigt at udføre en dynamisk simulering på timebasis for helt at sikre sig, at temperaturen ikke kommer under 22 °C om sommeren.

## 12.15. Dynamiske simuleringsprogrammer

Afsnittet om Dynamiske simuleringsprogrammer er medtaget i dette kapitel om Bygningsdynamik for helhedens skyld. I forbindelse med årssimuleringer af temperaturforhold og energiforbrug vil det være en stor fordel at benytte følgende to publikationer:

- Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017
- Branchevejledning for energiberegninger, 2014

Her er relevant information.

I dette afsnit benyttes materiale fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).

Afsnittet er relativt kort, da en del af den relevante information er medtaget i afsnit 9 om ”Varmebalance – Termisk indeklima”, eftersom en del information er relevant for metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”. Desuden vil afsnittet blive meget omfattende, hvis al relevant information skulle medtages.

### Største varme- /kølebelastninger

Hvornår de største varme- /kølebelastninger vil optræde afhænger af bygningens udformning:

Vinduesstørrelser/rudestørrelser

- Rudetyper
- Orientering
- Skyggeforhold
- Tung/let bygning
- Etc.

Det kan derfor ikke lade sig gøre at give generelle retningslinjer for, hvilke perioder der er dimensionerende. Dette kan imidlertid findes ved at lave en årssimulering med bygningen/lokalet og herud fra bestemme de perioder, der er vigtigst og benytte disse i den nærmere analyse af bygningen. En nærmere analyse bør altid inkludere en parameter undersøgelse af dimensionerende datoer for at sikre sig, at beregningsmodellen af lokalet optræder som ønsket. Hvis ikke dette gøres kan det i værste fald resultere i helt fejlagtige resultater og dermed fejlagtig dimensionering.

Et par eksempler kan være følgende:

- Et kontorlokale med personer undersøges med IDA ICE for temperaturforhold, hvor varmen i vinterperioden er slået fra for at vurdere lokalets indetemperatur under disse forhold.
  - Resultat: Personerne i kontorlokalet løber en dobbelt maraton i løbet af den 8 timers arbejdsdag for at kunne holde varmen! Et sjovt resultat; men det er spørgsmålet, hvor realistisk det er og hvor meget medarbejderne får arbejdet på computeren.

- Et kontorlokale med personer undersøges med BSim, hvor en solafskærmning aktiveres ved direkte stråling på vinduerne (værdi i  $\text{W/m}^2$ ) og en temperatur på over  $24^\circ\text{C}$ .
  - Resultat: I visse tilfælde kan resultatet af beregningen af temperaturen i kontorlokalet resultere i, at denne ligger mellem  $24^\circ\text{C}$  og  $26^\circ\text{C}$ . Hvis der kun ses på antallet af timer over  $26^\circ\text{C}$  i løbet af et år og det giver 0 timer – tilsyneladende flot resultat. Det som ikke ses, er at solafskærmninger er slået til 24/7 – Igen et urealistisk resultat, som ikke opdages.
- Et lokale har en række vinduer, hvor ruderne er placeret yderst og flugter med den udvendige væg. Lokalet undersøges med BSim. Hvis Recess funktionen ikke aktiveres sammen med XSun sol fordeling vil det resultere i en forkert beregning af solindfaldet. Denne fejl kan resultere i at solindfald kun beregnes til f.eks. 50% af det korrekte. Derfor skal Recess funktionen og XSun sol fordeling altid aktiveres. En bygherre eller andre, som skal vurdere beregninger foretaget med BSim skal altid sikre sig at disse parametre er håndteret korrekt.
- Et kontorlokale med personer ønskes undersøgt, hvor minimum indblæsnings-temperaturen er på  $16^\circ\text{C}$ , og der kun tillades indblæsning med en undertemperatur på  $6^\circ\text{C}$  i forhold til indetemperaturen.
  - Resultat: Hvis temperaturen i rummet kommer op på  $26^\circ\text{C}$ , og der i simuleringen indblæses med en temperatur på  $16^\circ\text{C}$  overvurderes kølekapaciteten i den pågældende time med ca. 67% ( $10^\circ\text{C}/6^\circ\text{C} - 1$ ). I praksis vil udsugningen ske i toppen af lokalet, hvor temperaturen er højere, og derved vil kølekapaciteten blive forøget, og dermed bliver fejlen mindre eller helt elimineret. Dette er et problem en del dynamiske simuleringsprogrammer ikke desto mindre har vanskelighed med at håndtere.

Udførelse af dynamiske simuleringer kræver en stor kompetence, og det er nødvendigt med en meget omhyggelig kontrol af den opstillede model af lokalet. Der indgår mange parametre, som skal spille korrekt sammen i overensstemmelse med de opstillede forudsætninger. Det er derfor en meget alvorlig fejl, hvis den opstillede model ikke analyseres nøje for udvalgte dage, for at se om modellen er korrekt.

## Perioder for det termiske indeklima

Ved dynamiske indeklimasimuleringer for det termiske indeklima deles simuleringsåret op i tre perioder:

- **Sommerperiode:** maj – september
- **Overgangsperiode:** april og oktober
- **Vinterperiode:** november – marts

For de enkelte perioder opstilles forskellige kravspecifikationer til temperaturer. Om sommeren vil personalet på varme sommerdage være let påklædt og en temperatur på  $21^\circ\text{C}$  kan derfor opleves

som lidt kølig, hvorimod personalet om vinteren har mere tøj på og denne temperatur vil derfor sædvanligvis opleves som behagelig. Forår og efterår kan der være dage med ret så varmt vejr, men også med en anelse frost, og der er derfor indkalkuleret en overgangsperiode i henholdsvis april og oktober.

### *Datoer og årstal for analyser*

For danske forhold ved anvendelse af det danske Design-Reference-år DRY2013 (Wang et al., 2012) kan for eksempel anvendes følgende datoer for skyfri varme sommerdage:

- 1. juli og 6. august

Det anbefales ifølge (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017), at der benyttes kalenderåret 2010 ved dynamiske simuleringer. Det er ikke vejrdato for det specifikke år 2010, som anvendes. Året vælges til 2010 for at alle, der foretager dynamiske simuleringer, vælger samme ugedag for den 1. januar, da dette kan have indflydelse på resultatet. Det anvendte år 2010 er uden skudår, hvilket er en anden fejlkilde, da der ved anvendelse af år med skudår kommer én ekstra dag med ved simuleringen. Forskellige dynamiske simuleringsprogrammer benytter også forskellige metoder for at kompensere for den ekstra indsatte dag.

For en given bygning udvælges et antal rum, der betragtes som repræsentative for undersøgelse af det termiske indeklima og dimensionering af de indgående systemer. De udvalgte rum baseres på, at det er typiske rum og/eller kritiske rum for bygningen.

De dynamiske indeklima simuleringer baseres på ønskede brugsprofiler for bygningen med tilhørende beskrivelse af opbygning af hele rummet inkl. vinduer og konstruktioner.



## 12.16. Litteratur/referencer

- Branchevejledning for energiberegninger. (2014). Mortensen, Lone (SBI, projektleder) og 17 andre, InnoBYG / Innovationsnetværket for bæredygtigt byggeri.
- Branchevejledning for indeklimaberegninger. (2017). Vorre, Mette Havgaard & Wagner, Mads Hulmose & Maagaard, Steffen E. & Noyé, Peter & Lyng, Nadja Lyng & Mortensen, Lone. InnoBYG / Statens Byggeforskningsinstitut, ISBN 978-87-563-1850-1.
- BR18 – Bygningsreglementet 2018. (2018). <http://bygningsreglementet.dk/>
- Christensen, J.E. (2018). *Brugervejledning til TCD programmet*. DTU Byg. Danmark.
- Dansk standard. (2005). *Jalousier og skodder – Termisk og visuel komfort – Bestemmelse af ydeevne og klassifikation*. (DS/EN 14501:2005). Charlottenlund. Lokaliseret 20170316 på: <https://webshop.ds.dk/da-dk/standard/ds-en-145012005>
- Dansk Standard. (2007a). *DS/EN 15251 – Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*. DS/EN 15251:2007. ICS: 91.040.01. Charlottenlund. Danmark.
- Dansk Standard. (2007b). *Solafskærmningsudstyr kombineret med ruder – Beregning af sol- og lystransmission – Del 1: Forenklet metode*. (DS/EN 13363-1 + A1:2007) med (DS/EN 13363-1 + A1/AC:2009). Charlottenlund. Lokaliseret 20170319 på: <https://webshop.ds.dk/da-dk/s%C3%B8gning?q=Solafsk%C3%A6rmningsudstyr+kombineret+med+ruder+%E2%80%93+Beregning+af+sol-+og+lystrans> Status tilbagetrukket
- Dansk Standard. (2017). *Bygningers energieffektivitet – Byggekomponenters og -elementers varmetekniske samt sol- og dagslysrelaterede egenskaber – Del 1: Forenklet metode til beregning af sol- og dagslysrelaterede egenskaber ved solafskærmning kombineret med vinduespartier*. (DS/EN ISO 52022-1:2017). Lokaliseret 20170319 på: <https://webshop.ds.dk/da-dk/s%C3%B8gning/ds-en-iso-52022-12017>
- Den lille blå om Ventilation.(2016). Hvenegaard, Claus M. & Drivsholm, Christian, Dansk Energi, 3. udgave 2016, ISBN 87-988903-0-1
- DANVAK. (2006). Hansen, H.E. (ed.), Kjerulf-Jensen, P. (ed.) & Stampe, O.B. (ed.). *DANVAK – Varme- og klimateknik grundbog*, 3. Udgave. ISBN: 87-982652-8-8, Danmark.
- DRY Danmark 2013, Det nye Design Reference Year for Danmark dækker perioden 2001-2010. Ved henvisning til referenceåret benyttes året 2013. Se (Wang et al., 2013).
- Olsen, Lars & Hansen, Magne. (2007). *Varmeakkumulering i beton – Vurdering af betons termiske masse i relation til bygningsreglementet og energiberegninger*. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 19 2007.
- SBI-anvisning 184. (1995). Aggerholm, S., Zacchariassen, H., Christensen, G., Olufsen, P., Clausen, V. og Pedersen, P. E. *Bygningers energibehov*. SBI-anvisning 184, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm.

SBi-anvisning 196. (2000). Valbjørn, Ole & Høwisch, John & Nielsen, Ove & Nielsen, Peter A. & Laustsen, Susse. *Indeklimahåndbogen*, 2. udgave, SBi-anvisning 196. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet. ISBN 978-87-563-1041-2.

SBi-anvisning 213. (2016a). Aggerholm, Søren & Sørensen, Karl Grau. (2016). *Bygningers energibehov*. SBi-anvisning 213, 4. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet. ISBN 978-87-563-1763-4.

SBi-anvisning 264. (2016b). Johnsen, Kjeld. *Solafskærmninger*. SBi-anvisning 264. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet. ISBN 978-87-563-1790-0.

Wang, Peter Riddersholm & Scharling, Mikael & Nielsen, Kristian Pagh. (2012). *2001 – 2010 Design Reference Year for Denmark*. DMI Teknisk Rapport 12-17. Danmarks Meteorologiske Institut. Rapport på dansk.

Wang, Peter Riddersholm & Scharling, Mikael & Nielsen, Kristian Pagh & Wittchen, Kim Bjarne & Kern-Hansen, Claus. (2013). *2001 – 2010 Danish Design Reference Year*. DMI Teknisk Rapport 13-19. Danmarks Meteorologiske Institut. Rapport på engelsk.

## 12.17. Appendiks A – Solstråling

Den modtagne solintensitet vinkelret på stråleretningen betegnes normalstrålingen. Lige uden for atmosfæren er den på mellem 1300 og 1400 W/m<sup>2</sup> med størst intensitet omkring vintersolhverv, hvor afstanden til solen er mindst. Ved middelfstanden mellem jorden og solen modtager jorden 1353 W/m<sup>2</sup>, og denne størrelse betegnes solkonstanten.

Solstråling deles op i tre hovedområder:

- Ultraviolet
- Synligt
- Infrarødt

I Tabel 12-21 er for de tre hovedområder vist fordelingen af solstrålingen uden for jordens atmosfære og ved jordens overflade. Det ses af tabellen, at det synlige lys kun udgør ca. halvdelen af hele solstrålingen (48 %).

*Tabel 12-21 Fordeling af solstrålingen uden for atmosfæren og ved jordens overflade*

Hovedområde	Ultraviolet	Synligt	Infrarødt
Bølgelængde (µm)	0-0,38	0,38-0,78	0,78-8
Fordeling uden for atmosfæren	6%	48%	46%
Fordeling ved jordoverfladen	2%	48%	48%

Solstrålingen betegnes også som kortbølget stråling og ligger i bølgelængde område fra 0,3 µm til 3 µm. Når solstrålingen går direkte igennem en rude, kommer ind i rummet og rammer en overflade, vil en del af strålingen blive reflekteret videre i rummet som kortbølge stråling. En anden del af strålingen vil blive absorberet af konstruktionen, og en del af denne energi vil blive akkumuleret i bygningskonstruktionen. For den absorberede del af energien gælder at noget vil blive afgivet fra overfladen dels ved konvektion og dels ved emitteret stråling til andre flader. Den emitterede stråling fra overfladen vil nu være omdannet til langbølge stråling, der har nogle andre karakteregenskaber end den kortbølgede stråling.

### Solindfald på flader

I litteraturen findes et meget stort antal beregningsmetoder og formler til beregning af solindfald, og solindfald på flader og gennem ruder. Det dynamiske simuleringsprogram BSim

I dynamiske simuleringsprogrammer er i mange tilfælde en valgmulighed mellem forskellige metoder, der vil give forskellige resultater. I BSim er der fire modeller at vælge mellem for beregning af solindfald:

- 1) Petersens solar model

- 2) Muniers solar model
- 3) Lunds solar model
- 4) Perezs solar model

Afhængig af den valgte metode vil det beregnede solindfald give forskellige resultater. Ud over dette vil de valgte vejrdata på årsbasis have stor indflydelse. Vejrdata til anvendelse i simuleringsprogrammer har på grund af klimaforandringerne ændret sig, og der er kommet nye opdaterede vejrdata, se afsnit 12.11.

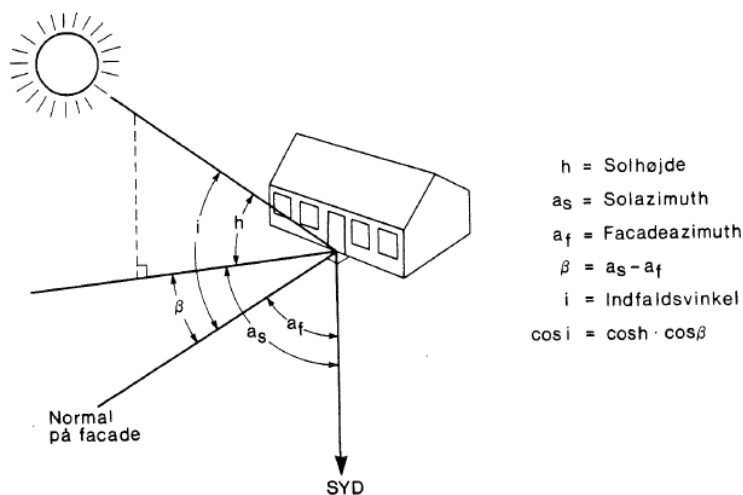
I dette kapitel gennemgås varmebalancen ved brug af døgnmiddelindetemperaturen, og i denne sammenhæng er valgt at anvende sol data baseret på (DANVAK, 2006). Disse soldata er symmetriske om time 12 (kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid), hvorved solindfaldet har samme størrelsesorden for øst og vest. Herudover er på figurer i (DANVAK, 2006) benyttet den 21. i hver måned for at få sammenfald med kurver for: november/januar, oktober/februar, september/marts, august/april, juli/maj.

Dette i modsætning til anvendelse af reference år, der er baseret på målte værdier. Dette kan resultere i, at der kan være markant forskel for en given skyfri dag på solindfaldet på en vest og østvendt facade. Dette er en faktor, brugeren bør være opmærksomhed på, eftersom det kan resultere i, at for en bygning med identiske rum mod øst og vest kan de nødvendige luftmængder blive forskellige på baggrund af denne forskel i solindfaldet. En forskel som ikke nødvendigvis er reel.

### *Flade vinkler og solens position*

#### *Flade vinkler*

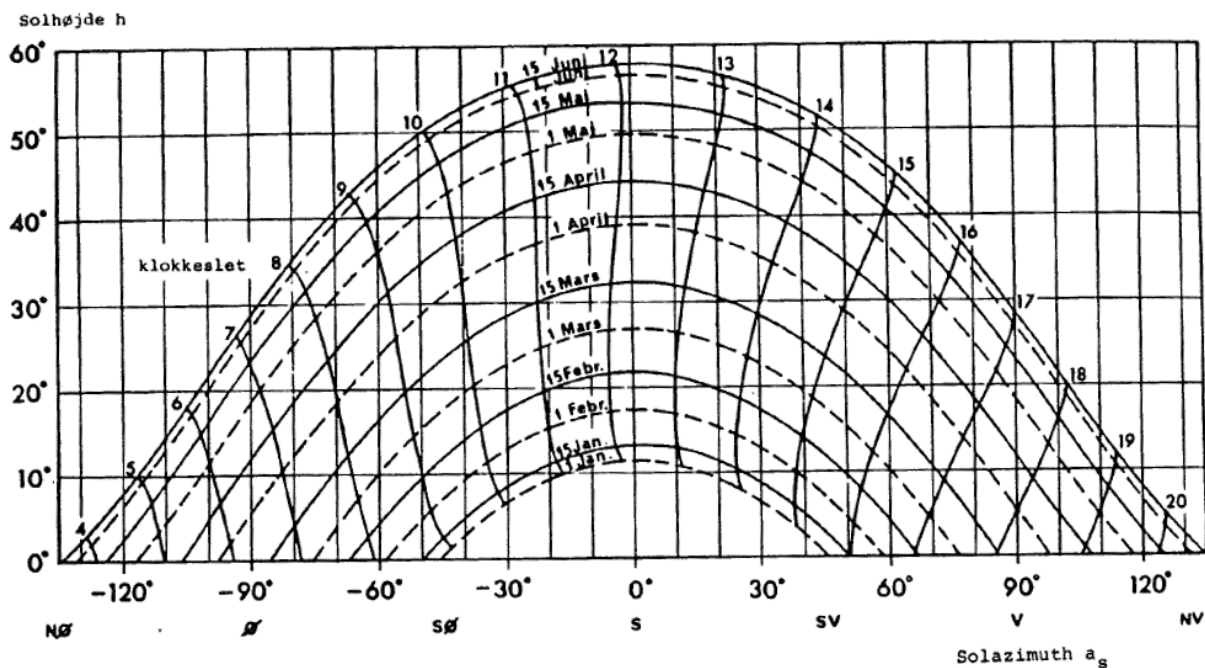
Orienteringen af en flade angives ved dens hældning med vandret,  $t$ , og facadeazimut,  $a_f$ , der er vinklen mellem den lodrette normal plan for fladen og den lodrette plan gennem syd retningen.  $a_f$  er nul mod syd og regnes negativ mod øst og positiv mod vest, Figur 12-12.



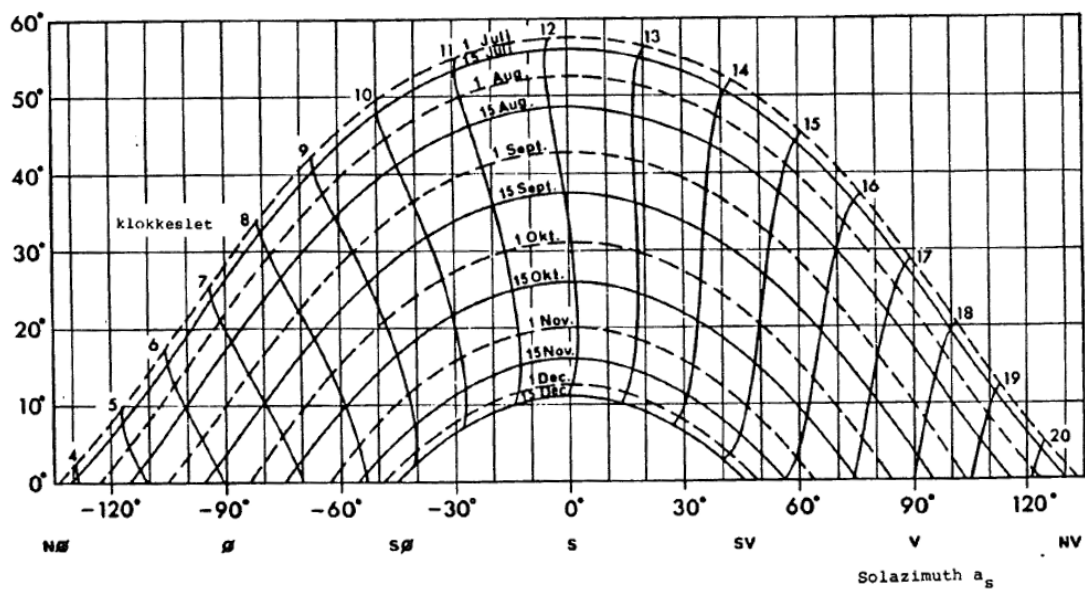
Figur 12-12 Beskrivelse af forskellige begreber ved solindfald

## Solens position

Solens position på himmelhvælvingen angives med solhøjden,  $h$ , og solazimut,  $a_s$ , der regnes med fortegn på samme måde som  $a_f$ , Figur 12-12. Solens højde afhænger af stedets geografiske beliggenhed, dato og klokkeslæt. I Figur 12-13 og Figur 12-14 er solhøjden og solazimut afbilledet som funktion af dato og klokkeslæt, gældende for København.



Figur 12-13 Solens position i København 1. januar – 15. juni



Figur 12-14 Solens position i København 1. juli – 15. december

## Solindfald

Ved solindfald på en flade skelnes mellem direkte og diffus stråling. Den direkte stråling kan betragtes som kommende fra solen, som udgør en punktformig kilde, der bevæger sig henover himmelhvælvingen. Den diffuse stråling består dels af diffus himmelstråling dels af reflekteret diffus stråling fra omgivelserne.

Den direkte solindstråling mod en overflade er først og fremmest afhængig af solens højde på himlen og strålernes indfaldsvinkel. På en skyfri dag udgør den direkte stråling fra solen op til ca. 90 % af totalstrålingen.

Følgende fire begreber er vigtige i forbindelse med beregning af solindfald:

- **Indfaldsvinkel** Indfaldsvinklen er vinklen mellem den direkte solstrålings retning og fladens normal, dvs. det er en linje der står vinkelret på fladen.
- **Direkte solstråling** Den direkte solstråling er den del af solstrålingen, der kommer direkte fra solen uden at være blevet spredt i atmosfæren.
- **Diffus solstråling** Den diffuse solstråling er den del af solstrålingen, der spredes i atmosfæren og derfor ikke kommer direkte fra solskiven, men fra andre steder på himmelhvælvingen.
- **Reflekteret solstråling** Den reflekterede solstråling er den del af solstrålingen, der rammer jordoverfladen og andre objekter og kastes tilbage herfra.

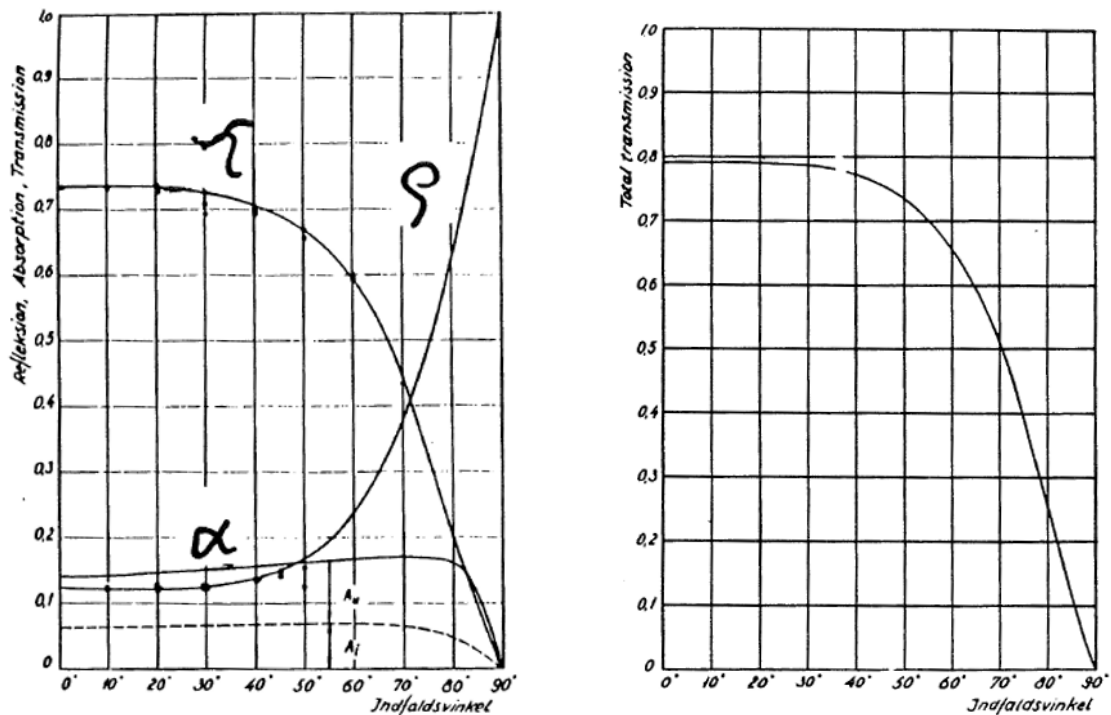
## 12.18. Appendiks B – Solindfald gennem rude

En vigtig del af en bygnings klimaskærm er vinduer, som har til formål at beskytte mod udeklimaet i kombination med at skabe udsyn og få dagslys ind i lokalet. Vinduer vil ikke blive beskrevet nærmere i dette kapitel, idet der henvises til relevant litteratur. Fokus vil i stedet for være på ruder med deres tilhørende solindfald og bidrag til rummets varmebalance.

### *Soltransmission gennem glasrude*

Når solstråling rammer en glasrude, bliver en del reflekteret ( $\rho$ ), en del absorberet ( $\alpha$ ) og en del transmitteret ( $\tau$ ). Størrelsen af  $\rho$ ,  $\alpha$  og  $\tau$  er afhængig af glastypen, vindueskonstruktionen, indfaldsvinklen og strålingens spektralfordeling.

Den del af strålingen, der bliver absorberet, vil bevirke, at glassets temperatur stiger, indtil der opstår en ligevægtstilstand mellem den absorberende varme og den varme, der afgives ved konvektion og langbølget stråling til omgivelserne. Absorptans varierer meget lidt med indfaldsvinklen i modsætning til transmittans og reflektans, der er meget vinkelafhængig. For vinkler mellem 0 og 40 grader er transmissionen og refleksionen næsten konstant, hvorimod transmissionen aftager meget ved større indfaldsvinkler, og refleksionen tilsvarende stiger, Figur 12-15.



Figur 12-15 VENSTRE: Reflektans ( $\rho$ ), absorptans ( $\alpha$ ) og transmittans ( $\tau$ ) af direkte solstråling for en almindelig dobbeltrude som funktion af indfaldsvinklen i. HØJRE: Totaltransmissionen for den direkte solstråling gennem en almindelig dobbeltrude som funktion af indfaldsvinklen

## Illustration af lineær interpolation

Tabellerne for transmitteret direkte solstråling i Afsnit 12.19 Appendiks C er opgivet for orienteringer i spring på 45 grader, f.eks.: syd, sydvest, vest, nordvest, etc. Herudover er resultaterne vist for den 21. i hver måned.

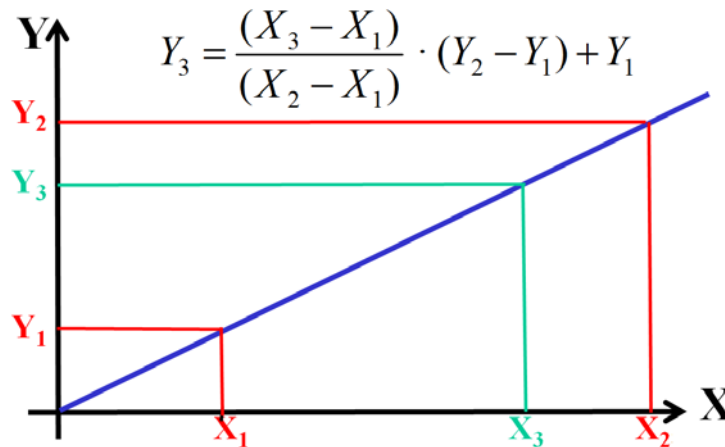
Hvis den givne orientering ikke stemmer overens med de opgivne orienteringer eller det er en anden dato end den 21 i måneden, kan det blive nødvendigt at udføre en lineær interpolation. Da lineær interpolation ikke indgår i skolens pensum længere, er der i det følgende givet ligningen for udførelse af lineær interpolation.

Lineær interpolation kan udføres ved brug af formlen:

$$Y_3 = \frac{(X_3 - X_1)}{(X_2 - X_1)} \cdot (Y_2 - Y_1) + Y_1$$

*Ligning 12-34*

På Figur 12-16 er formlen med tilhørende illustration vist.



*Figur 12-16 Illustration af lineær interpolation med tilhørende formel*



## 12.19. Appendiks C – Tabeller solstråling, reference dobbeltrude

I dette afsnit vises tabeller for transmitteret solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude kendetegnet ved følgende egenskaber:

- 4 mm floatglas – 12 mm luft – 4 mm floatglas. U-værdi  
Transmissionsfaktor for solenergi på 0,76 (g-værdi, solfaktor) :  $g_{reference} = 0,76$

Tabellerne er baseret på (DANVAK, 2006) og er beregnet for skyfri dage med maksimal solbelastning. Der er regnet med den 21. i hver måned, hvilket gør det muligt i (DANVAK, 2006) at have to orienteringer på hver kurve, og dermed få parrede kurver for: november/januar, oktober/februar, september/marts, august/april, juli/maj.

Soldata er i sand soltid med beliggenhed længdegrad 15 grader øst. Data er symmetriske om time 12 (kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid), og på denne måde opnås, at solindfaldet har samme størrelsesorden for øst og vest. Tidsforskellen for solens vandring mellem længdegrad 15 grader øst (Bornholm) til København og Esbjerg er henholdsvis 11 og 25 minutter.

Det står ikke beskrevet nogen steder, hvor soldata i (DANVAK, 2006) stammer fra, og hvordan de er beregnet. Ved DTU Byg er der blevet foretaget nogen sammenligninger, der indikerer, at den største overensstemmelse fås ved benyttelse af BSim på følgende måde:

- Munier's sol model anvendes
- Skydække sættes til 0 og direkte stråling korrigeres i forhold til denne ændring. Disse ændringer implementeres i vejrdatafilen og der simuleres med den nye tilpassede vejrdatafil
- Den direkte stråling i (DANVAK, 2006) er inklusiv reflekteret stråling med refleksion fra jordoverfladen på 25% – Reflektans  $\rho = 0,25$ .
- Længdegraden sættes til 15 grader øst
- Recess funktionen skal benyttes og sættes til 0,0001 m og XSun sol fordeling skal være sat til. Recess funktionen benyttes til at placere ruden i forhold til den udvendige vægs overflade.

Generelt i BSim er det altid vigtigt at benytte Recess funktionen, da der ellers kan forekomme meget store fejl ved beregningen af solindfaldet. En rude placeret helt yderst i en væg kan således få beregnet et solindfald på kun f.eks. 50% af det korrekte, hvis recess funktionen ikke er benyttet.

I det følgende vises i alt 8 tabeller for transmitteret direkte solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude i enheden:  $W/m^2$ . Tabel 12-22 til Tabel 12-29 er i spring på 45°: Syd, Sydvest, Vest, etc. Den transmitteret direkte solstråling antages at være inklusiv reflekteret stråling med refleksion fra jordoverfladen på 25% (reflektans  $\rho = 0,25$ ). Herudover vises en tabel for den transmitterede diffuse himmelstråling for samme rude, Tabel 12-30.

Det er standard dobbeltruden, som er benyttet som reference rude i (DANVAK, 2006) og i TCD programmet (Christensen, 2018).

Tabel 12-22 Syd: Transmitteret direkte solstråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Syd																		SUM
					8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2
Januar						212	372	466	494	466	372	212						2594
Februar					160	324	456	538	562	538	456	324	160					3518
Marts					178	336	454	524	552	524	454	336	178					3536
April					114	266	382	450	476	450	382	266	114					2900
Maj					54	180	294	366	392	366	294	180	54					2180
Juni					22	146	254	332	350	332	254	146	22					1858
Juli					54	180	294	366	392	366	294	180	54					2180
August					114	266	382	450	476	450	382	266	114					2900
September					178	336	454	524	552	524	454	336	178					3536
Oktober					160	324	456	538	562	538	456	324	160					3518
November						212	372	466	494	466	372	212						2594
December						110	310	408	442	408	310	110						2098

Tabel 12-23 Sydvest: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Sydvest																		SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2
Januar								216	336	408	406	292						1658
Februar								232	394	482	524	448	328					2408
Marts								202	370	484	558	560	492	324	0			2990
April								128	306	438	518	538	506	408	244	36		3122
Maj								76	244	372	456	482	462	388	262	106		2848
Juni								56	222	346	426	454	434	370	262	106		2676
Juli								76	244	372	456	482	462	388	262	106		2848
August								128	306	438	518	538	506	408	244	36		3122
September								202	370	484	558	560	492	324	0			2990
Oktober								232	394	482	524	448	328					2408
November								216	336	408	406	292						1658
December								196	302	362	330	146						1336

Tabel 12-24 Vest: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Vest																			SUM
									12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2	
Januar									0	62	172	188						422	
Februar									0	88	244	294	298					924	
Marts									0	88	280	422	508	394	0			1692	
April									0	88	280	442	536	536	414	90		2386	
Maj									0	88	280	442	536	566	512	360	92	2876	
Juni									0	88	280	442	536	566	534	402	210	3058	
Juli									0	88	280	442	536	566	512	360	92	2876	
August									0	88	280	442	536	536	414	90	0	2386	
September									0	88	280	422	508	394	0			1692	
Oktober									0	88	244	294	298	0				924	
November									0	62	172	188	0					422	
December									0	52	136	90						278	

Tabel 12-25 Nordvest: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Nordvest																			SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2	
Januar																		0	
Februar																		0	
Marts												12	122	190	0			324	
April												36	192	314	312	100		954	
Maj												74	240	380	434	370	100	1598	
Juni											0	94	296	400	464	424	264	1942	
Juli												74	240	380	434	370	100	1598	
August												36	192	314	312	100		954	
September												12	122	190	0			324	
Oktober																		0	
November																		0	
December																		0	

Tabel 12-26 Nord: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Nord																			SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2	
Januar																		0	
Februar																		0	
Marts																		0	
April		22	10												10	22		64	
Maj	54	124	42	0										0	42	124	54	440	
Juni	152	156	62	0										0	62	156	152	740	
Juli	54	124	42	0										0	42	124	54	440	
August		22	10												10	22		64	
September																		0	
Oktober																		0	
November																		0	
December																		0	

Tabel 12-27 Nordøst: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Nordøst																			SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2	
Januar																		0	
Februar																		0	
Marts			0	190	122	12												324	
April		100	312	314	192	36												954	
Maj	100	370	434	380	240	74												1598	
Juni	264	424	464	400	296	94	0											1942	
Juli	100	370	434	380	240	74												1598	
August		100	312	314	192	36												954	
September			0	190	122	12												324	
Oktober																		0	
November																		0	
December																		0	

Tabel 12-28 Øst: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Øst																		SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2
Januar						188	172	62	0									422
Februar					298	294	244	88	0									924
Marts			0	394	508	422	280	88	0									1692
April		90	414	536	536	442	280	88	0									2386
Maj	92	360	512	566	536	442	280	88	0									2876
Juni	210	402	534	566	536	442	280	88	0									3058
Juli	92	360	512	566	536	442	280	88	0									2876
August		90	414	536	536	442	280	88	0									2386
September			0	394	508	422	280	88	0									1692
Oktober					298	294	244	88	0									924
November						188	172	62	0									422
December						90	136	52	0									278

Tabel 12-29 Sydøst: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i  $W/m^2$ . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ( $\rho = 0,25$ )

Sydøst																		SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2
Januar						292	406	408	336	216								1658
Februar					328	448	524	482	394	232								2408
Marts			0	324	492	560	558	484	370	202								2990
April		36	244	408	506	538	518	438	306	128								3122
Maj		106	262	388	462	482	456	372	244	76								2848
Juni		106	262	370	434	454	426	346	222	56								2676
Juli		106	262	388	462	482	456	372	244	76								2848
August		36	244	408	506	538	518	438	306	128								3122
September			0	324	492	560	558	484	370	202								2990
Oktober					328	448	524	482	394	232								2408
November						292	406	408	336	216								1658
December						146	330	362	302	196								1336

På den næste tabel vises Transmitteret diffus himmelstråling gennem en uafskærmet ref. dobbeltrude i W/m<sup>2</sup>.

*Tabel 12-30 Transmitteret diffus himmelstråling gennem en uafskærmet ref. dobbeltrude i W/m<sup>2</sup>*

Diffus stråling																		SUM
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m <sup>2</sup>
Januar					0	8	13	15	16	15	13	8	0					88
Februar				0	10	15	18	19	20	19	18	15	10	0				144
Marts			0	12	17	20	22	24	24	24	22	20	17	12	0			214
April		3	13	18	21	24	26	28	29	28	26	24	21	18	13	3		295
Maj	3	12	17	20	24	27	29	31	32	31	29	27	24	20	17	12	3	358
Juni	7	14	18	22	25	28	30	32	33	32	30	28	25	22	18	14	7	385
Juli	3	12	17	20	24	27	29	31	32	31	29	27	24	20	17	12	3	358
August		3	13	18	21	24	26	28	29	28	26	24	21	18	13	3		295
September			0	12	17	20	22	24	24	24	22	20	17	12	0			214
Oktober				0	10	15	18	19	20	19	18	15	10	0				144
November					0	8	13	15	16	15	13	8	0					88
December						4	10	13	14	13	10	4						68